



Universidad
Carlos III de Madrid

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UN CASCO DE COMBATE FRENTE A **CARGAS DINÁMICAS**

AUTOR: Pedro Martín Pérez

TUTOR: Marcos Rodríguez Millán

Leganés, Septiembre 2015

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. OBJETIVOS	4
1.2. MOTIVACIÓN	5
2. EL CASCO ANTIEXPLOSIVOS	6
2.1. UTILIZACIÓN.....	8
2.2. OTROS USOS	10
3. MATERIALES.....	14
3.1. Tensión - deformación / ley de Hooke	14
3.2. Materiales empleados.....	17
3.2.1.Cabeza	18
3.2.2.Casco.....	19
3.2.3.Espumas.....	20
4. DISEÑO.....	22
5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	24
6. ENSAYOS	29
6.1. PRIMER ENSAYO, SIN CASCO	31
6.1.1.Frontal sin casco	31
6.1.2.Lateral sin casco	37
6.1.3.Trasera sin casco	42
6.1.4.Superior sin casco.....	46
6.2. SEGUNDO ENSAYO, CON CASCO.....	51
6.2.1.Frontal con casco.....	51
6.2.2.Lateral con casco	55
6.2.3.Trasera con casco	58
6.2.4.Superior con casco	62
6.3. TERCER ENSAYO CON CASCO Y ESPUMAS.....	66
6.3.1.Frontal con casco y espumas	66
6.3.2.Lateral con casco y espumas.....	71
6.3.3.Trasera con casco y espumas.....	75
6.3.4.Superior con casco y espumas	79
7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	82
7.1. Explosión frontal	82
7.2. Explosión lateral.....	86
7.3. Explosión trasera.....	91
7.4. Explosión superior	96
8. CONCLUSIONES	101
9. BIBLIOGRAFIA.....	102
ANEXO 1. DISEÑO DE ESTRUCTURA.....	103

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto versa sobre el diseño y fabricación de un casco de combate antiexplosivos.

En el mismo se detallará de forma simulada como pueden afectar las cargas de una explosión sobre una cabeza humana con y sin protección y lo que ello conllevaría.

Para la realización de este proyecto se han realizado dos trabajos claramente diferenciados:

- El primero ha consistido en la realización de un **diseño** de un maniquí de pruebas, o “dumie”, para realizar las simulaciones además del casco que lo protegerá en las mismas, el cual es el objeto de estudio.
- Posteriormente, se realizarán **simulaciones** detalladas de explosiones en diferentes casos para poder observar cómo evolucionan los daños sobre el sujeto.

Este estudio, aunque este enfocado al uso en combate, no tendrá por qué estar delimitado únicamente para ese uso. Obviamente, brigadas de detección y desactivación de explosivos necesitan de estudios de este estilo para implementar sus trajes de trabajo, pero además existe otros colectivos, expuestos a materiales explosivos o con posibilidad de ello, que también encontrarán utilidad en estudios de resistencias de materiales para sus herramientas o trajes de trabajo.

Bomberos, policías, trabajadores de determinados laboratorios químicos o investigadores, ellos también se exponen en determinadas ocasiones a materiales que, dadas circunstancias determinadas, pueden llegar a hacer explosión. Para ellos también va enfocado este estudio.

1.1. OBJETIVOS

Con este estudio, se quiere conseguir información sobre cómo pueden afectar los explosivos, no solo en un campo de batalla, sino en todas las actividades que requieran estar cerca de materiales posiblemente volátiles, ya sean bomberos, policías, laboratorios químicos, etc.

Estudiaremos las partes que más pueden dañarse en la cabeza según las fuerzas que se empleen en la operación y, a raíz de esa información, implementaremos un diseño mejor de nuestro casco protector para subsanar los daños producidos en los anteriores ensayos. De esta manera, lograremos realizar un diseño final mucho más eficiente.

A raíz de los resultados de estos análisis también se podrán obtener datos sobre si los materiales que utilizamos son los adecuados o no, pudiéndose sustituir por otros más ligeros o más resistentes, dependiendo de los objetivos y funciones que queramos alcanzar con nuestro casco.

1.2. MOTIVACIÓN

En el trabajo ingenieril, es básico aprender a usar bastantes de las herramientas que estén a nuestro alcance y que posiblemente, en un futuro, formen parte de nuestro trabajo diario.

Por ello, la utilización de programas de diseño de piezas es un añadido perfecto para una carrera de ingeniería mecánica y será de mucha utilidad en un futuro.

Por esta misma causa, este proyecto tiene valor doble ya que no solo se utiliza y perfecciona la técnica en el uso de herramientas de diseño sino que también se emplean herramientas de cálculo de elementos finitos, otras de las más usadas en este ámbito.

Por sí mismo, a parte del valor didáctico, este proyecto proporciona la capacidad de trabajar en equipo (el estudio lo realizamos entre dos personas en colaboración con distintas partes cada uno), desarrollar imaginación en los diseños e informarnos del proceso de creación y diseño que cualquier sistema o material manufacturado lleva a cabo de manera previa a su fabricación.

El estudio de nuevos diseño en materia de seguridad profesional es otro factor a tener en cuenta a la hora de realizar este estudio. Invertir en desarrollo e investigación de nuevas formas de seguridad en el trabajo, sea cual sea la tarea que empeñemos, es siempre un aliciente para esforzarnos al máximo en que nuestros estudios llegue a buen puerto.

2. EL CASCO ANTIEXPLOSIVOS

Desde la antigüedad, en el momento en que el hombre fue consciente de la gravedad de las heridas que se producían en la cabeza, se creó la necesidad de protegerla. Así fue como nació la utilización del casco como elemento de protección.

Ya fueran obreros, cazadores o guerreros, proteger una de las partes más importantes de su cuerpo se convirtió en indispensable para la elaboración de sus tareas. En ese momento también surgió la necesidad de un diseño para esos cascos primitivos. Un diseño primario obviamente, que muchas veces tendía más al ornamento que a la propia eficiencia a la hora de proteger, pero que son los inicios de lo que hoy utilizaremos para la realización de este proyecto.

Así la civilización fue avanzando, y fueron apareciendo nuevos daños que amenazaban la integridad de nuestra cabeza. Guerras, minería, grandes obras o, por qué no, simple estética, llevaron a perfeccionar estos diseño de protección alcanzando a los sistemas que tenemos actualmente.

Con la aparición de la pólvora, es cuando realmente podemos observar realmente avances en diseños enfocados a disminuir los daños provocados por esta extraña sustancia, que explotaba lanzando todo tipo de metralla, aumentando la temperatura y propulsándonos a nosotros mismo como si de un golpe se tratara.

Así fue como aparecieron los primeros diseños de cascos creados específicamente para proteger al ser humano del efecto de una explosión.



1 - Casco M1 Americano II Guerra Mundial

El aumento del armamento explosivo, y no solo del armamento, sino de elementos volátiles a los que se puede exponer el hombre a partir de esa época es exponencial. Desde el descubrimiento de la pólvora hasta nuestros días muchos son los peligros derivados de materiales explosivos a los que estamos expuestos.

Quizá el primer gran avance respecto a lo que en sí, era un casco enfocado 100% a evitar el daño explosivo lo encontramos en la I y II Guerra Mundial. Soldados zapadores y antiminas llevaban un traje especial, que no reducía el daño al mínimo pero sí que podía salvarles la vida en caso de explosivo.

Era un traje muy rudimentario, hecho en su mayoría de acero, que no permitía prácticamente visibilidad, ni movilidad y cuyo peso hacía casi imposible moverse con él. Eran trajes similares a los utilizados en la marina para sus tropas submarinas, los buzos.

De hecho, los efectos de la presión del agua y los de una explosión son muy similares. Las fuerzas comprimen los materiales, con lo que tenemos que buscar gran resistencia.



2 - Casco antiexplosivos I Guerra Mundial

Seguimos avanzando en la historia hasta llegar a la creación de los primeros grupos especializados en trabajar en la desactivación de explosivos, los grupos de artificieros.

Casi cualquier cuerpo de policía del mundo tiene un cuerpo de artificieros, que varía su uniforme según el país pero que se basa en los mismos principios de protección. De los trajes utilizados por estos grupos será de lo que hablemos a continuación.

2.1. UTILIZACIÓN

En el mundo del material antiexplosivo, existen varios trajes o equipo determinado utilizado para este fin. En nuestro proyecto estudiamos exclusivamente la utilidad de un casco antiexplosivos pero por lo general, el traje completo suele ser la única solución realmente útil a la hora de enfrentarnos a una explosión. Esto es lo que detallamos a continuación.

El traje antiexplosivos más conocido, el que utilizan los técnicos y zapadores del ejército expertos en desactivación de bombas es el EOD (Explosive Ordnance Disposal, o traje de disposición de explosivos). Este traje es el que utilizaron las fuerzas especiales americanas en Irak, hace 10 años. Vamos a detallar su composición y funcionamiento:

Estos trajes constan de un sistema de armadura rígida y uno de armadura suave. Ambas capas están diseñadas para evitar las dos amenazas mayores durante una explosión: el pulso de sobrepresión (también conocido como onda de choque), y la fragmentación o metralla.

La onda de sobrepresión es la más peligrosa. Un microsegundo después de que estalla la bomba, la explosión comprime todo el aire alrededor y lanza con rapidez una onda de choque que aplasta los órganos internos. La capa externa rígida del EOD es la principal defensa contra la onda. Está compuesta por aramidas, fibras sintéticas con resistencia a choques, a la abrasión, a los disolventes orgánicos y al calor (como el Kevlar). La parte delantera del traje está reforzada de pies a cabeza con dos o más aramidas, optimizadas para la resistencia y la ligereza. Esta capa rígida puede rebotar una parte de la energía de sobrepresión, así como repeler metralla.

Sin embargo, la onda de sobrepresión atraviesa esta armadura rígida. La siguiente protección está elaborada de una capa de espuma de poliuretano o caucho sintético, cuya función es absorber la mayor cantidad de pulso posible. El objetivo del material es reducir dramáticamente la presión de la onda de choque, a un nivel tan bajo que se pueda sobrevivir al golpe cuando alcance el cuerpo.



3 - Traje EOD



4 - Técnico antiexplosivos trabajando con traje EOD

Detrás de la capa de absorción se encuentra el blindaje ligero, compuesto de un tejido de fibras de aramida y otros materiales. Esta capa actúa como un chaleco antibalas tradicional, ya que también ayuda a detener la fragmentación que se haya podido colar por la armadura exterior rígida. De hecho, los trajes espaciales de la NASA también poseen una capa de aramida similar para resistir los impactos de los micrometeoritos en el espacio.

La careta del casco es transparente para que el técnico pueda ver lo que hace, y también recibe el mayor impacto si ocurre una explosión. Está hecho de acrílico endurecido, pero rodeado por una capa suave de policarbonato alrededor de la cara del usuario, ya que si la placa sólo fuera de un material duro, la explosión destruiría la cara de los técnicos. El casco está equipado también con un recubrimiento anti-niebla, una lámpara, cámara de video, y un

dispositivo de comunicación bidireccional. También cuenta con un ventilador para soplar aire fresco en la cara del técnico.

Como dato curioso, los trajes también incluyen guantes protectores, pero en la práctica, casi ningún técnico los emplea, ya que prefieren la sensibilidad de los dedos desnudos.

Por último, el traje incluye una capa con un sistema de enfriamiento que hace circular agua helada por el cuerpo del técnico, ya que el calor dentro de la armadura es casi insoportable. El peso de uno de estos trajes oscila entre los 27 y los 32 kilos.

2.2. OTROS USOS

Los cascos antiexplosivos no solo tienen funciones bélicas o de desactivación de explosivos. Muchos trabajos actuales incluyen el peligro de exponerse a materiales inflamables o explosivos que pueden provocar daños graves al ser humano.

Como muestra, algunos ejemplos de cascos que se utilizan para varios usos que no son específicamente desactivación de explosivos:



5 - Casco de bomberos de la Comunidad de Madrid

En la imagen se observa el casco reglamentario de los bomberos de Madrid (5). Son de diferentes colores para diferenciar los rangos de mando pero estructuralmente son todos iguales.

El casco de bomberos es una protección destinada a la protección de la cabeza de impactos, fuego, materiales inflamables, (cualquier tipo de acelerante o material que pueda incendiarse una vez adherido a la piel) o también, materiales explosivos.

El estudio del presente proyecto es perfectamente aplicable en este caso, ya que la utilidad del casco interviene directamente en sus funciones.



6 - Casco de construcción

El casco de la imagen anterior es el típico casco de obra o construcción (6). Está destinado a proteger la cabeza del trabajador de cualquier golpe que pudiera recibir en la elaboración de su trabajo. El mayor riesgo no es golpearse la cabeza contra algo, sino que cualquier objeto que se precipite desde una altura considerable pueda impactarle en la cabeza.

Este casco no está destinado directamente a la exposición a explosivos, pero las consecuencias de un impacto directo de un objeto pesado pueden

asemejarse a las que vamos a estudiar en este proyecto, con lo que también serían datos a tener en cuenta para la elaboración y diseño de un casco de obra.

Lo que se representa en la siguiente imagen es un casco de automovilismo (7). Se trata de un casco de motociclismo pero este tipo de cascos pueden emplearse también en cualquier práctica deportiva del motor, ya sean coches, motos, camiones...

Este tipo de casco está destinado a proteger la cabeza ante posibles golpes provocados por la colisión del vehículo que se conduce. Esta colisión es más peligrosa cuanto menos protección aporta el vehículo en cuestión. Por lo tanto, un conductor de moto necesitará mayor protección que un conductor, por ejemplo de camión.



7 - Casco de automovilismo

Además, en todo tipo de prácticas automovilísticas, aparte del problema de golpes y colisiones, tendremos otro tipo de peligros, menos usuales, pero que pueden darse. Ya sea quemarnos por fricción con el propio asfalto, recibir impacto de materiales que se proyecten por la colisión o, la propia explosión del parte del vehículo que conducimos, como el depósito de gasolina.

Por lo tanto, esta disciplina sí que afectara directamente al objeto de estudio de este proyecto, pudiendo utilizar los resultados para la realización de diseño de casco de automoción.



8 - Casco aeroespacial

Este casco es un casco aeroespacial (8). Es el empleado en misiones más allá de la atmósfera terrestre y en el espacio por los astronautas.

Este diseño de casco fue enfocado a resistir las altas presiones que existen en el espacio generadas por el vacío del exterior, ya que el casco en su interior no lo está, el aire de dentro tiende a salir fuera para nivelar presiones.

Por este mismo motivo, debe ser un casco muy resistente ya que cualquier golpe que le provoque una fisura puede hacer que se pierda oxígeno por ella y ahogar a la persona que lo está utilizando.

Además de diseñado para amortiguar golpes, aguantar altas presiones y ser aislantes, también deben ser ignífugos, aislar de la radiación y, cómo no, deben resistir una explosión.

Es un caso similar al casco de submarinismo. Deberá aguantar las altas presiones que produce el agua a altas profundidades y evitar que el agua penetre en el interior.

Por último tenemos los ejemplos de cascos utilizados para deportes de alto contacto (9). En estos deportes se intenta proteger la cabeza de potentes impactos, contra el suelo o contra otro jugador. Se trata de cascos que también suelen llevar acompañado un apoyo cervical para las torsiones del cuello, cosa que en el estudio de nuestro casco barajaremos para poder paliar sus efectos.

Otros ejemplos de cascos deportivos serian cascos de bici, de skate, de esquí, de hípica, etc.

Todos estos cascos están enfocados principalmente a impactos contra el suelo y protegen sobretudo la parte trasera de la cabeza, la nuca, uno de los puntos más críticos de la misma.

Los impactos contra el suelo de la nuca son muy fuertes en caídas por la inercia que coge la cabeza a caer desde cierta altura. La cabeza rota y golpea bruscamente contra el suelo o contra otro objeto, provocando gran daños.

En nuestro proyecto pondremos principal atención a este suceso en nuestros ensayos de la parte trasera del casco, para evitar lo máximo posible el impacto y la rotación de la cabeza por la parte de la nuca.

Estos y algunos más son ejemplos claros de la utilización de cascos de seguridad para los cuales, nuestro estudio de cascos está perfectamente justificado y puede ser de gran utilidad, aunque en un principio se base únicamente en el daño explosivo.



9 - Casco deportivo, futbol americano

3. MATERIALES

3.1. Tensión-DEFORMACIÓN / LEY DE HOOKE

Es inevitable, antes de presentar los materiales utilizados en nuestros ensayos, hacer una breve introducción teórica de las características que buscamos a la hora de elegir un material u otro.

Así pues, hablaremos de las propiedades de los materiales y de que les sucede al incidir una tensión sobre ellos. Sobre todo enfocaremos el estudio en materiales metálicos, que son los que usaremos en su mayoría en los ensayos.

Todo material metálico, cuando se ejerce sobre él una tensión, se comporta de manera determinada.

Dependiendo de la deformación que se produzca en el material, podremos realizar gráficas que relacionen estas dos variables, creando así las curvas de tensión/deformación.

No solo los materiales metálicos pueden representar su deformación de esta manera, de hecho, todos los materiales ensayados tienen sus curvas de tensión/deformación definidas.

DIAGRAMA DE TENSION/DEFORMACIÓN

Es la curva resultante graficada con los valores del esfuerzo (tensión) y la correspondiente deformación de la probeta utilizada a partir de los datos de un ensayo de tensión o de compresión.

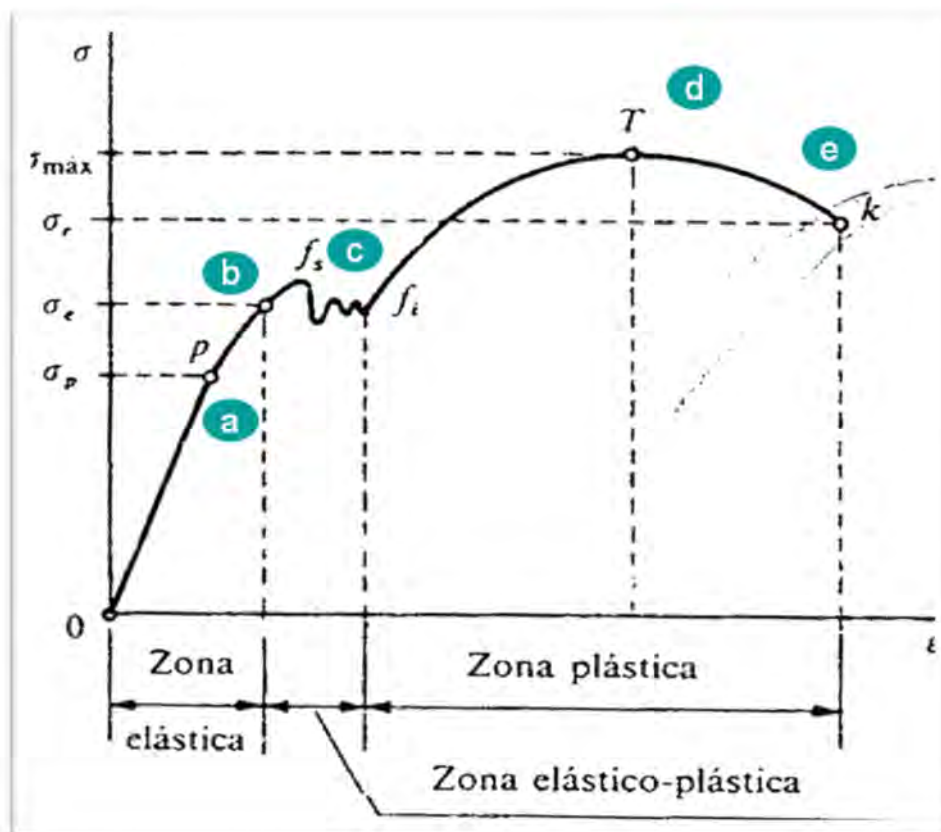
Antes de estudiarla, debemos saber en qué consiste la zona elástica. Esta zona se rige por la ley de Hooke, que muestra la relación directa que existe en el material entre la tensión que se le aplica a la probeta de ensayo y la deformación que sufre. Esta relación se expresó con la siguiente ecuación:

$$\sigma = E\varepsilon$$

10 - Ley de Hooke

Donde E se denomina módulo de elasticidad y es una propiedad intrínseca del material. También se conoce como módulo de Young y toma valores muy distintos de unos materiales a otros.

Gracias a esta ecuación, definimos la parte elástica del material (zona (a) de la gráfica).



11 - Gráfica tensión/deformación de un material X

El dominio elástico de la curva finaliza cuando la tensión alcanza un determinado valor denominado límite elástico, de elasticidad o tensión de plastificación (b). En esta zona, la deformación sufrida por la probeta se recupera íntegramente una vez que cesa la carga a la que la misma se encuentra sometida. Más allá de dicha tensión, el material plastifica y por tanto, al ser descargado, no recupera totalmente su forma original, sino que queda con una deformación permanente que denominamos deformación plástica.

El punto (c) del diagrama corresponde al punto de fluencia. En este instante aparece un considerable alargamiento del material, sin el correspondiente aumento de carga, que, incluso, puede disminuir mientras dura la fluencia. Cabe destacar que el fenómeno de la fluencia es característico de algunos materiales como el acero al carbono, mientras que hay otro tipo de materiales en los que no se manifiesta.

En el punto (d) de la curva tiene lugar un proceso de inestabilidad de la probeta conocido como el fenómeno de estricción de la misma, que consiste en un estrangulamiento del fuste de la probeta. El valor de la tensión justo en este momento se conoce como resistencia a tracción del material o esfuerzo máximo.

Si a partir de este punto sigue aumentando la carga a la que es sometida, finalmente, se produce la rotura de la probeta (punto (e) de la curva). Al valor de la tensión en este último punto se le denomina tensión de rotura del material.

3.2. MATERIALES EMPLEADOS

A continuación, vamos a detallar los materiales de los que se compone este proyecto.

Además de la parte del diseño, una vez tengamos nuestro casco, debemos ensayarlo para saber cuánto de eficiente es frente a cargas dinámicas explosivas.

Para ello, implementamos una serie de características en forma de propiedades a cada parte de nuestro sistema a ensayar.

Se van a utilizar en todo momento (a excepción de las espumas) materiales con propiedades metálicas. Esto es debido a que buscamos ensayos rápidos y sin muchos detalles, ya que solo nos interesaran las zonas donde falla nuestra estructura para perfeccionarlas posteriormente. Trabajaremos con órdenes de magnitud y zonas de las superficies de nuestra estructura más débiles; sabiendo estos datos, podremos añadirle más estructuras a nuestro diseño que disminuyan tanto la carga como las zonas críticas.

Así pues, a continuación detallamos las características que se emplearon en los ensayos de cada pieza por separado.

3.2.1. CABEZA

La cabeza será nuestra primera estructura a ensayar. Para la realización de los ensayos, el material debe ser ligero.

Seleccionamos unas propiedades de aluminio. Nos darán ligereza de material y resistencia suficiente para que no se rompa en los ensayos y nos muestre con seguridad las zonas donde recibe mayores impactos.

Este aluminio será el utilizado en pruebas de balística y antiexplosivos, el AA2024-T351. A continuación detallamos algunas de sus propiedades principales, las cuales serán las utilizadas para implementar el ensayo en nuestro programa.

ALUMINIO AA2024-T351	
Densidad	2700 Kg/m ³
Módulo de Young	74.66 GPa
Módulo de Poisson	0.3
Parámetros Johnson-Cook de plasticidad	
A	352 MPa
B	440 MPa
n	0.42
m	1.7
C	0.0083
Tm	775 K
Parámetros Johnson-Cook de daño	
D1	0.112
D2	0.123
D3	1.5
D4	0.007
D5	0
Tm	775 K
Te	296 K

3.2.2. CASCO

Para el material que utilizará nuestro casco necesitamos propiedades diferentes a las de la cabeza. Debe ser algo más pesado pero también más resistente, ya que buscamos una diferencia característica a la hora de medir la relación peso/resistencia que ganaremos a la hora de añadir o no el casco.

Así pues, para ensayar esta parte, utilizaremos acero. Un acero característico de ensayos de explosivos, al igual que hicimos con el aluminio. En este caso, se tratará de acero Weldox 460-E. Este acero es característico por su alta resistencia y elevada ductilidad, frecuentemente empleado en aplicaciones estructurales de absorción de energía.

Weldox está diseñado para satisfacer y superar altas exigencias y normas del sector de la elevación; es más robusto que el acero ordinario aunque su coste por tonelada es significativamente mayor. Además, su altísimo límite elástico permite reducir el peso del producto sin sacrificar su resistencia. El acero Weldox se usa con frecuencia en la fabricación de grúas, plataformas aéreas y otras aplicaciones de ingeniería avanzada que requieren precisión, consistencia y la eficiencia en el taller.

Al igual que se hizo con el aluminio, a continuación mostramos las propiedades técnicas de este material que utilizaremos para implementar nuestros ensayos:

ACERO Weldox 460-E	
Densidad	7850 Kg/m ³
Módulo de Young	200 GPa
Módulo de Poisson	0.33
Parámetros Johnson-Cook de plasticidad	
A	490 MPa
B	807 MPa
n	0.73
m	0.94
C	0.012
T _m	1800 K
Parámetros Johnson-Cook de daño	
D1	0.0705
D2	1.732
D3	0.54
D4	0.0123
D5	0
T _m	1800 K
T _e	296 K

3.2.3. ESPUMAS

Para el material de las espumas no podemos elegir un material rígido tipo metálico ya que no son las características que buscamos.

Para este ensayo buscamos amortiguar la acción de la explosión, con lo cual utilizaremos características típicas de las espumas de los cascos.

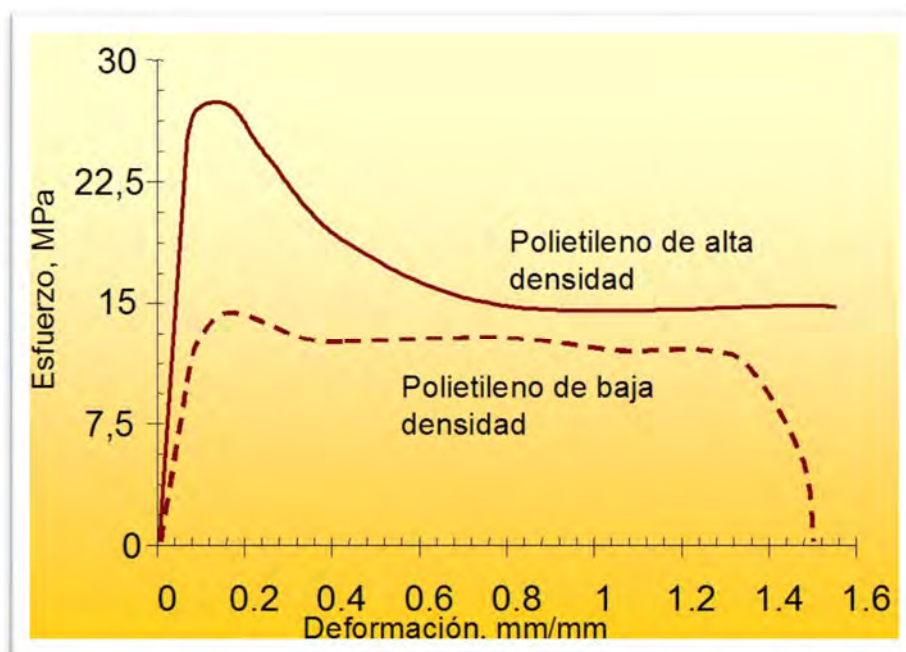
Son propiedades ligeras y de alta amortiguación, que repartirán la fuerza de la explosión por toda la superficie en contacto con las espumas, evitando que se acumule toda en el mismo punto, cercano al foco de la explosión.

Todos los cascos, sean para la finalidad que sean, llevan espumas con características similares a las utilizadas, aunque los materiales pueden variar según otro tipo de características, no mecánicas, necesarias.

Así para un casco de moto por ejemplo, además de amortiguar buscaremos que sea transpirable para evitar el sudor y el calor y aumentar el confort. Por otro lado, un casco de bomberos sobretodo buscará un material de espumas que sea lo menos inflamable posible, ya que el contacto con material inflamable será inevitable en su trabajo.

En nuestros ensayos no tendremos en cuenta ninguna de esos factores, con lo que se usará una espuma genérica como la indicada anteriormente.

Habitualmente, lo más utilizado a la hora de colocarle espumas a un casco, son las espumas de polietileno. Nuestro material tiene propiedades muy similares.



12 - Gráfica tensión - deformación del polietileno

4. DISEÑO

Varias son las herramientas a nuestro alcance a la hora de realizar el diseño de una pieza. A nivel ingenieril, los sistemas más utilizados a la hora de diseñar cualquier sistema o estructura son los programas y aplicaciones para ordenador.

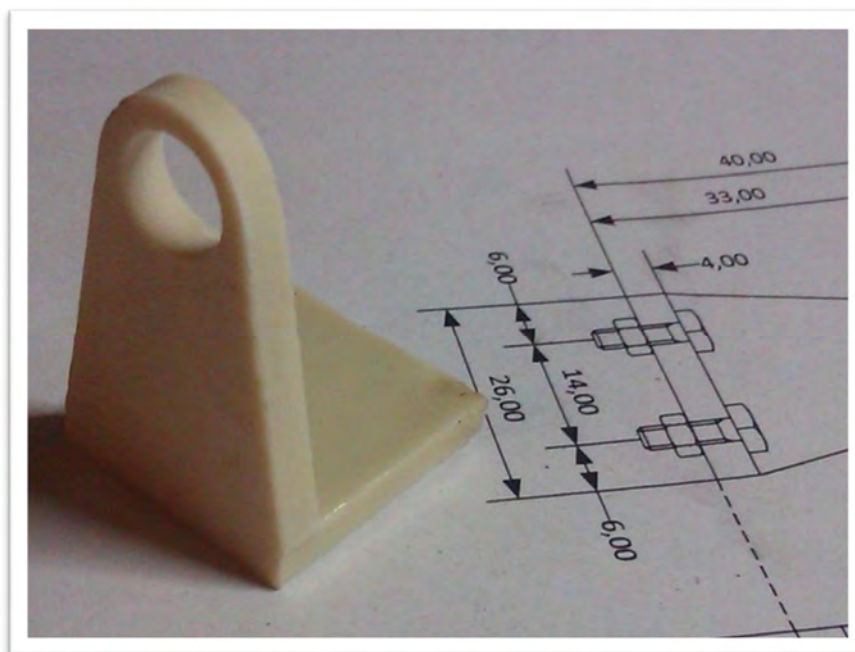
Programas de diseño gráfico por ordenador son utilizados a diario para la realización de prototipos de ensayo en el ámbito ingenieril. Algunos de estos programas más conocidos como Pro Engineer o Catia serán los utilizados en este proyecto para realizar el diseño de nuestras piezas.

Por lo general, en la industria actual, todo material debe someterse previamente a un proceso de diseño y edición del mismo para poder sacar el máximo partido a lo que estamos buscando. Gracias a un buen diseño, podemos mejorar las características del objeto a fabricar, abaratando materiales o mejorando funciones.

Todo proceso de diseño comienza con una idea principal, en el caso de este proyecto, será la elaboración de un casco que soporte explosiones. A partir de esta idea empieza la recogida de información.

Primero buscamos todos los datos que podamos acerca de forma, materiales, peso, resistencia, y características que ya existan de lo que estamos intentando diseñar. Esto será fácil si el sistema en cuestión ya existe, como es nuestro caso, pero puede darse el caso de que nos pidan diseñar algo que aún no existe.

En este caso, el proceso creativo debe acompañarse de más recogida de información. Buscaremos datos similares a lo que queremos lograr, u otros casos en los que alguien haya intentado realizar lo mismo con diferente resultado.



13 - Cotas en papel

**14 - Planos de diseño**

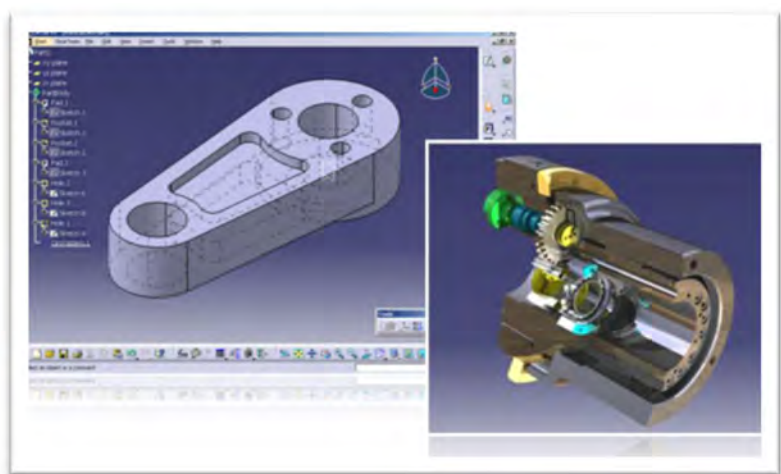
Una vez tenemos toda la información empezamos lo que realmente es el proceso de diseño, en el debemos tomar decisiones primarias como medidas, cotas, tamaños, volúmenes, pesos... Algunas veces podremos utilizar lo que queramos y otras veces estos datos nos vendrán impuestos ya sea porque el objeto en cuestión debe de ir en una cavidad reducida, o ser resistente, o ligero...

Una vez sepamos que queremos hacer y cómo lo queremos hacer, realizamos un boceto o esquema de la forma inicial que queremos que tenga. Este boceto solo será orientativo ya que, cuando el diseño en sí comience, tendremos que ajustarnos a restricciones y adaptar el diseño a ellas.

Es aquí cuando se utilizan las herramientas de diseño por ordenador. A base de implementar planos en 2D, podremos realizar estructuras en 3D con medidas reales. Con las estructuras ya diseñadas, podemos pasar al proceso de ensayo para ver los defectos en sus funciones.

Cualquier material que se componga de un conjunto de piezas ha pasado por un proceso similar a este. Es más, cada una de las piezas de las que se componga este conjunto también tendrá que someterse a un proceso de diseño para lograr que el conjunto funcione correctamente.

Una vez tenemos nuestro diseño y lo hemos ensayado, utilizamos los datos que conseguimos para mejorar de nuevo nuestro boceto inicial y, progresivamente, mejorarlo en la medida que sea posible, implementando así un proceso de mejora continua en el que cada vez conseguiremos una estructura más eficiente y así, alcanzar nuestro objetivo.

**15 - Diseños por ordenador**

5. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

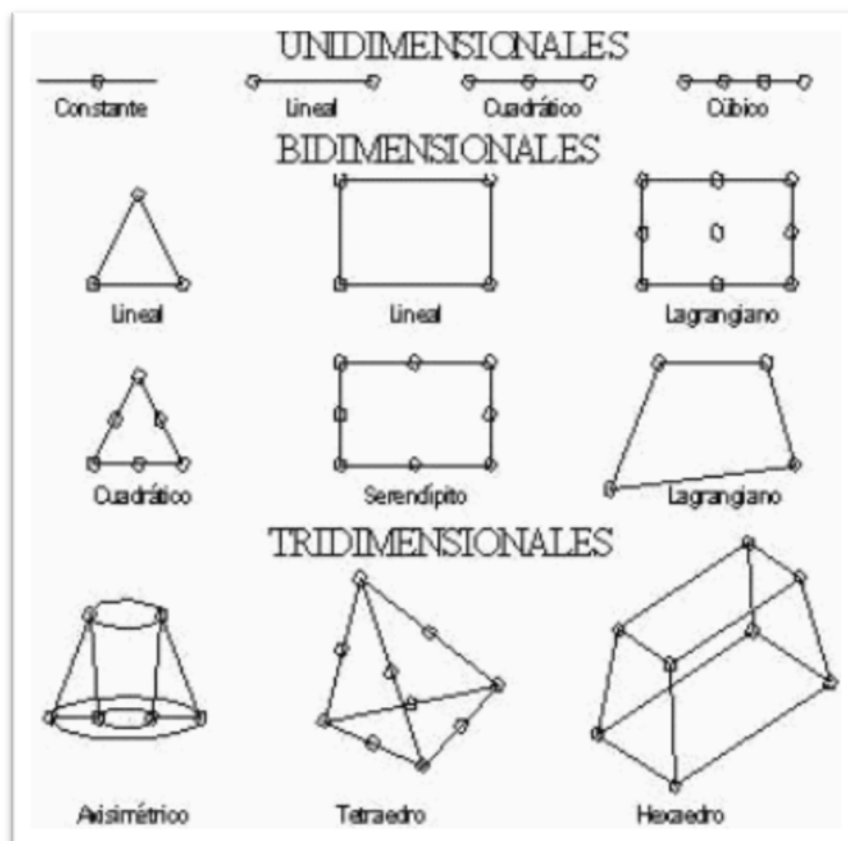
Para la realización de las simulaciones a las que someteremos nuestro sistema de estudio utilizaremos una herramienta de cálculo con el método de elementos finitos (MEF en castellano, FEM en inglés). Esta herramienta será el programa ABAQUS CAE.

Para mejorar la comprensión de los datos obtenidos, a continuación explicamos brevemente el funcionamiento de este método de cálculo para la obtención de los resultados de nuestros ensayos.

El método de elementos finitos, o en su abreviatura común, MEF, es un método de cálculo numérico que es capaz de interpretar parte de lo que sucede a nivel estructural de cualquier pieza sometida a fuerzas, ya sean internamente o externas.

Así pues, es un método perfecto para el cálculo de tensiones y deformaciones producidas, por ejemplo, tanto en estructuras grandes como edificios o en mecanismos pequeños, cómo determinadas partes de un motor. En nuestro caso, estudiará lo que sucede con nuestro dumie y que fuerzas tendrá que soportar ante los diferentes ensayos a los que se someterá.

Estos cálculos se basan en la simplificación de las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de los sólidos. El MEF transformara esas ecuaciones en otras algebraicas más sencillas para que, en sucesivas iteraciones, dependiendo de los factores, lleguemos a conseguir resultados reales.



16 - Tipos de elementos

Su metodología consiste en dividir nuestra estructura en partes más pequeñas y fáciles de calcular gracias al principio de energía potencial mínima. Estas partes se conocerán como elementos y al proceso de división se le conocerá como discretización.

Cada uno de los elementos finitos que se crean (pueden ser de diferentes formas) tendrán nodos en sus vértices. Estos nodos son los que unirán unos elementos con otros dando nuestra estructura final. Gracias a ellos lograremos conseguir nuestros datos de deformaciones, desplazamientos y tensiones que extrapolados a nuestro mecanismo final, nos dará esos mismos datos aplicados al conjunto.

Matemáticamente, este método se implementa gracias a la elaboración de matrices que integran nuestro número de elementos, nodos, las propiedades del material, las tensiones a las que está sometido y demás datos necesarios para el cálculo. Estas matrices se detallan a continuación.

En general, en un problema a analizar por el Método de los Elementos Finitos, conoceremos las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los valores de los desplazamientos en otros (dependiendo de las ligaduras que posea el sólido).

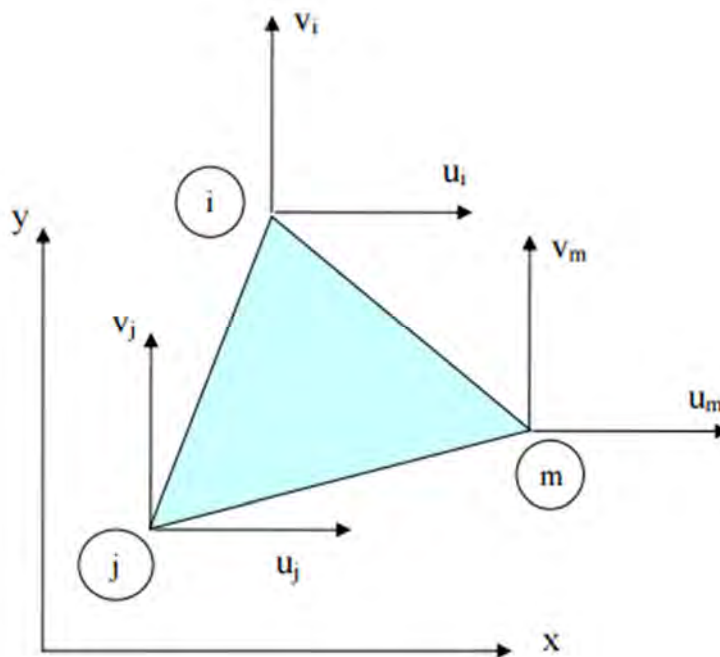
La clave del método está en que, tras su aplicación, obtendremos una expresión del tipo:

$$\{F\} = [K]\{u\}$$

En la que, $\{F\}$ es un vector columna, conocido como vector de cargas, en el que están todas las fuerzas exteriores que actúan sobre el sólido. El vector $\{u\}$, denominado vector de desplazamientos nodales, representa todos los desplazamientos que experimentan los nudos del modelo. La matriz $[K]$, que se conoce como matriz de rigidez del sistema estructural.

A continuación mostraremos una breve explicación de cómo se consiguen implementar estas 3 matrices de forma genérica.

En nuestro ejemplo usaremos como elemento de estudio el siguiente:



El vector que agrupa los desplazamientos nodales lo vamos a representar por:

$$\{a\}_k = \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \end{pmatrix}$$

Suponiendo que el subíndice "k" toma los valores "i,j,m".

El vector $\{u\}$ que proporciona el campo de desplazamientos en el interior del elemento es:

$$\{u\} = \begin{pmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{pmatrix}$$

La idea clave del Método, consiste en suponer que el vector $\{u\}$ puede escribirse a partir del vector $\{a\}$:

$$\{u\} = \left[[N_i(x,y)], [N_j(x,y)], [N_m(x,y)] \right] \{a\}^T$$

Siendo el conjunto de matrices de N funciones de forma del elemento. Este conjunto de matrices se caracterizaran por las restricciones, formas y distancias de nuestra figura.

A raíz de estas matrices conseguimos una que las engloba a todas, que sería la matriz de forma del elemento $[N]$.

Las deformaciones inducidas en el interior del elemento pueden expresarse, de una manera más general, como:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u(x,y) \\ v(x,y) \end{Bmatrix} = [L]\{u\}$$

$$\{\varepsilon\} = [L]\{u\} = [L][N]\{a\}^e = [B]\{a\}^e$$

Donde la matriz [L] es, en realidad, una matriz operador y la matriz [B], puede expresarse en forma de submatrices, como sigue:

$$[B_k] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_k(x,y)}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_k(x,y)}{\partial y} \\ \frac{\partial N_k(x,y)}{\partial y} & \frac{\partial N_k(x,y)}{\partial x} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_k & 0 \\ 0 & c_k \\ c_k & b_k \end{bmatrix}$$

Tomando el subíndice "k" los valores "i,j,m". La matriz [B], para el elemento triangular que estamos considerando, sería:

$$[B] = \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix}$$

Las tensiones en el interior del elemento se podrían obtener a partir de las deformaciones utilizando las ecuaciones constitutivas:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{a\}^e$$

La aplicación del Principio de los Trabajos Virtuales nos llevaría a que la matriz de rigidez del elemento $[K]$, puede expresarse, en el caso del elemento triangular en tensión plana que estamos considerando, de esta manera:

$$[K^e] = [B]^T [D] [B] e \cdot Area$$

Por tanto, si el vector $\{F\}$ representa las fuerzas nodales que actúan sobre el elemento, se tendría que:

$$\{F\}^e = [K^e] \{a\}^e$$

Obviamente, cuanto mayor número de elementos y nodos tenga nuestra estructura, más complejos se harán los cálculos, y aquí es donde entra en juego la implementación informática de un programa, capaz de procesar tal cantidad de datos con cálculos simples rápidamente. Lo que para una persona ocuparía una cantidad grandísima de tiempo, un ordenador es capaz de hacerlo en segundos y con mayor precisión de cálculo, dándonos unos resultados fieles.

Esto no quiere decir que los programas basados en el método de elementos finitos sustituyan a los ensayos físicos, ya que para lograr datos 100% reales, tendremos que ensayar nuestros diseños igualmente. Lo que supone un avance es lograr aproximarnos a lo que sería un resultado 100% sin necesidad de emplear dinero, tiempo y recursos en realizar prototipos y ensayarlos y podemos centrar el estudio en prototipos mucho más eficientes y cercanos a lo que buscamos.

6. ENSAYOS

En el presente estudio, los ensayos consistirán en exponer nuestro ejemplo de cabeza a un factor externo que le genere tensiones y lograr realizar una cobertura eficiente para eliminar tensiones que generarían daño al ser humano, repartiéndolas en el sistema de seguridad.

Para realizar estos ensayos, como ya se comentó anteriormente, utilizaremos la plataforma ABAQUS/CAE. En ella, utilizaremos la herramienta "blast", que emula los resultados de una onda expansiva generada por una explosión.

Nuestra explosión tendrá unas características determinadas. En ella no se tienen en cuenta sucesos que serían factores determinantes en un caso real. Así pues, en este ensayo, no se tendrán en cuenta los daños generados por metralla o variación de temperaturas, presentes en las explosiones reales, siendo factores de bastante del daño causado por la misma. En este ensayo solo se tendrá en cuenta los efectos producidos por la onda expansiva de la explosión.

Una vez obtenidos los primeros resultados del daño producido a la cabeza desnuda, se irá optimizando un casco, gracias al diseño del mismo, que nos haga paliar los daños sufridos por nuestra cabeza ficticia, en lo que sería un proceso similar al que se seguiría a la hora de diseñar un casco real.

Se realizarán diferentes ensayos de cada parte para poder observar su comportamiento ante diferentes situaciones y poder perfeccionar así nuestro diseño enfocado a diferentes situaciones.

Así pues, se realizaran 4 ensayos de cada parte:

6.x.1 - Frontal

6.x.2 - Lateral

6.x.3 - Trasera

6.x.4 - Superior

Estos 4 ensayos se harán cada vez que añadamos una parte nueva al diseño, para ver cómo cambia la distribución de tensiones y finalmente comparar resultados.

Los ensayos se realizarán con las características adaptadas a cada parte del cuerpo:

El explosivo utilizado para la simulación será el TNT (es el explosivo que utiliza por defecto el ABAQUS).

La cantidad de explosivo será siempre de 1kg. Esta cantidad sería la equivalente a un cartucho de dinamita. La cantidad de explosivo es orientativa, ya que, como comentamos anteriormente, no se darán los efectos que realmente produciría esa cantidad de explosivo. Es la masa necesaria para señalar las partes dañadas ante la onda expansiva de una explosión cercana, no es un caso real.

La distancia del foco de la explosión varía dependiendo la posición de la explosión. Esto se hace para equilibrar las explosiones ya que la cabeza no es simétrica en todas sus medidas y se intentará buscar siempre una distancia a la superficie de contacto similar, ya que la distancia se tomará a partir del centro de coordenadas del sistema.

La superficie de incidencia de la onda siempre será la superficie más cercana al foco de la explosión.

La explosión se iniciará en el tiempo 00:00:00, produciéndose en un trascurso que varía dependiendo del caso, pero que siempre mostrará el impacto inicial de la explosión, que será el punto más grave de incidencia, pudiéndose ver los daños de mejor manera.

6.1. PRIMER ENSAYO, SIN CASCO

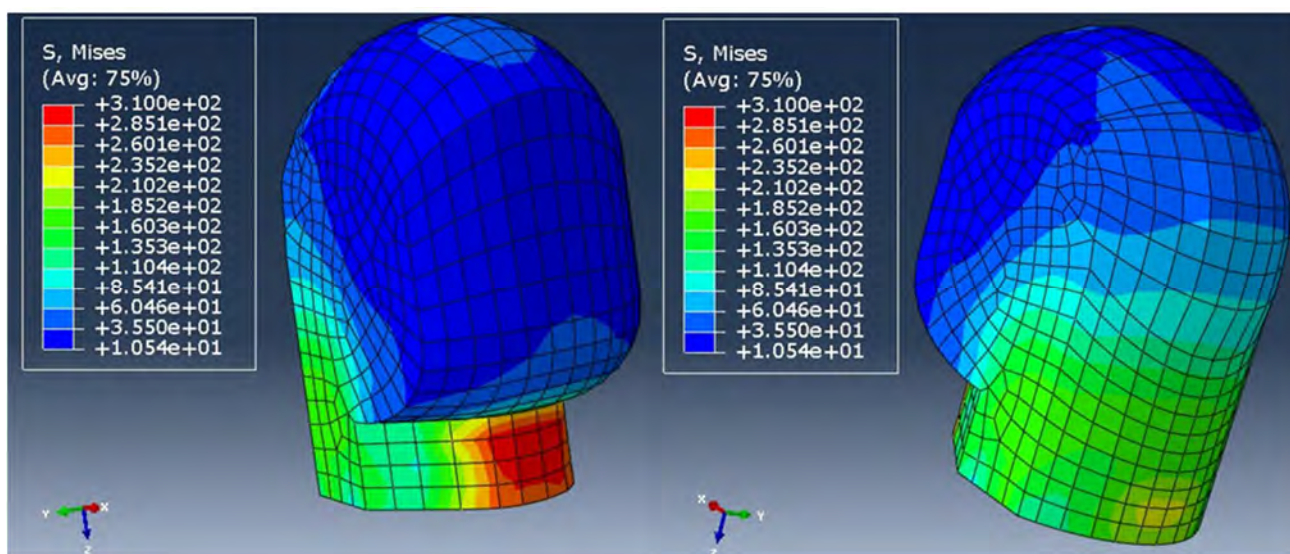
En este primer ensayo, exponemos la cabeza desnuda a las explosiones. De esta manera comprobaremos cuales son los puntos débiles de la misma para enfocar nuestro diseño en la buena dirección.

6.1.1. Frontal sin casco

En este caso, se realizó la simulación de una explosión que incidirá sobre la superficie frontal de nuestro dumie.

Esta explosión se dio con 1Kg de TNT situados a 200mm del origen de coordenadas de nuestro diseño, lo que colocará la carga explosiva a 100mm de la superficie frontal.

Los resultados obtenidos para este caso son los siguientes:



17 - Tensiones en la cabeza tras el ensayo de explosión frontal

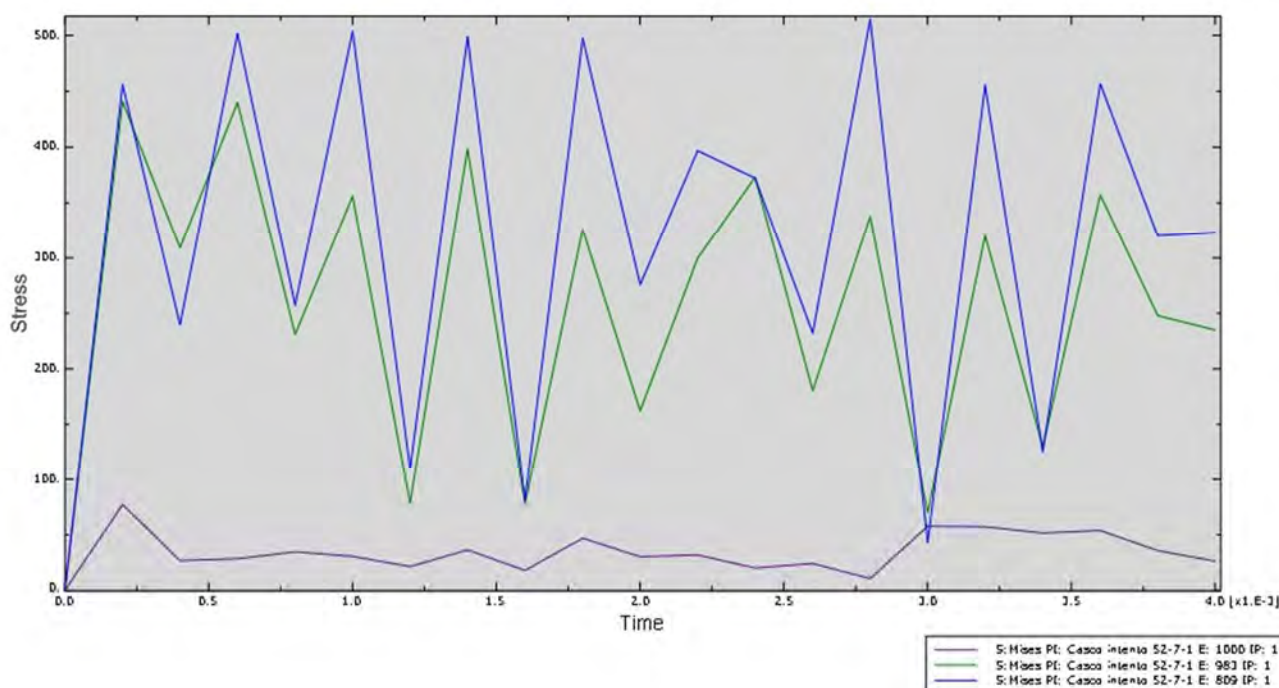
En una primera observación, vemos que la mayor parte de las tensiones se agrupan en la base de la cabeza.

Como si se tratara de una viga en voladizo con una carga distribuida en su longitud, las tensiones se agrupan en su empotramiento, ya que es la parte más débil de la estructura.

En este caso sucede de la misma manera, la explosión hace las veces de carga distribuida que se aplica en la parte frontal de la cabeza. Esa carga genera un momento torsor que, cuanto más se aleje del empotramiento, más fuerza genera y con ella, más tensión.

La magnitud de las tensiones, dentro de que no es real, entra dentro de la normalidad, llegando incluso a romper la estructura por la base. Aun así nos indica la parte donde se produce mayor daño en este ensayo, que es lo realmente interesante del caso, para luego poderla proteger mejor. La magnitud la utilizaremos para compararla con los casos posteriores, solo será un dato orientativo.

Para poder observar mejor este fenómeno y comparar posteriormente, realizamos la gráfica con los datos:



18 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo de cabeza frontal

Para la realización de esta gráfica cogimos 3 puntos característicos de nuestra estructura. El primero, de color morado, será un punto de la superficie frontal de la cabeza, donde se situaría la cara. Por otro lado, la representación azul de la gráfica se trata de un punto situado en el cuello, donde se producen las tensiones más altas. Por último, el punto verde muestra lo acontecido en un punto del cuello, pero en la parte trasera, en la nuca.

Estos resultados nos enseñan cómo no son tan graves los daños producidos en la parte frontal como los producidos en el cuello. Como ya comentamos, este suceso dista bastante de la realidad, ya que simplemente la metralla, los restos del propio cartucho además de cualquier elemento que se encuentre dentro de la onda expansiva, impactarían sobre la superficie de la cara produciendo muchos más daños que los apreciados en la imagen.

Otra observación que se puede sacar de esta grafica es la diferencia de tensiones entre los 2 puntos. Mientras que la tensión que recibe la cara es una tensión con un pico inicial, y que luego se mantiene más o menos constante, la tensión del cuello tiene máximos y mínimos indiferentemente. Esto indica que el cuello entró en resonancia.

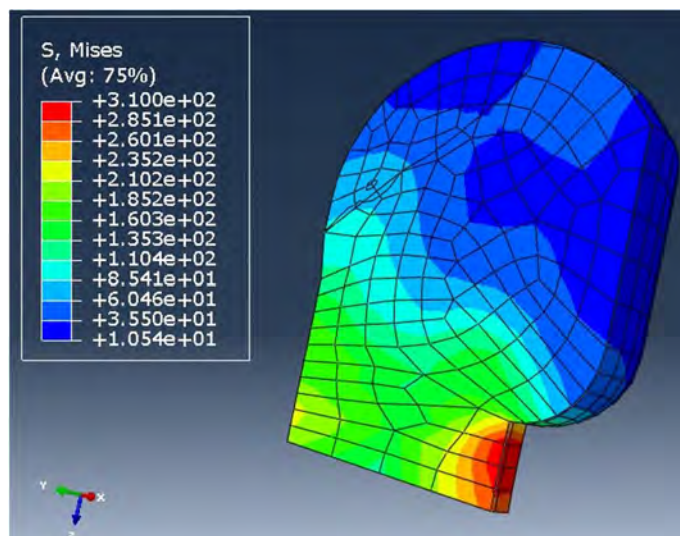
Cuando un sistema en voladizo, como sería una simplificación muy básica del que estamos estudiando, entra en resonancia, es porque las vibraciones que genera la onda expansiva han provocado un momento en su extremo. Este momento ha generado un giro en sentido favorable a la fuerza de la onda expansiva. Una vez llegado a su punto más extremo, si el sistema no cede, esto es, si el material no alcanza la tensión de rotura, tiende a volver a su posición original.

Cuanto mayor sea la masa del material, más inercia alcanzará en su recuperación, pudiendo darse el caso de que, la fuerza, al contrarrestarse, provoque el mismo efecto que el anterior pero en sentido contrario produciendo una vibración.

Esto seguirá pasando hasta que las fuerzas finalmente se compensen, o hasta que el material ceda por desgaste, ya que cada desplazamiento provoca grandes tensiones en el apoyo, como se observa en la gráfica.

Pese a este factor, descubrimos un problema importante a solucionar que es disminuir la carga que genera en nuestro cuello la onda expansiva, en los siguientes diseños intentaremos afrontar este problema.

Para acabar con las tensiones producidas, es interesante investigar cómo se ha comportado nuestra estructura a nivel interno. Esto lo podemos conseguir partiendo la cabeza y viendo cómo se han distribuido las tensiones en su interior:

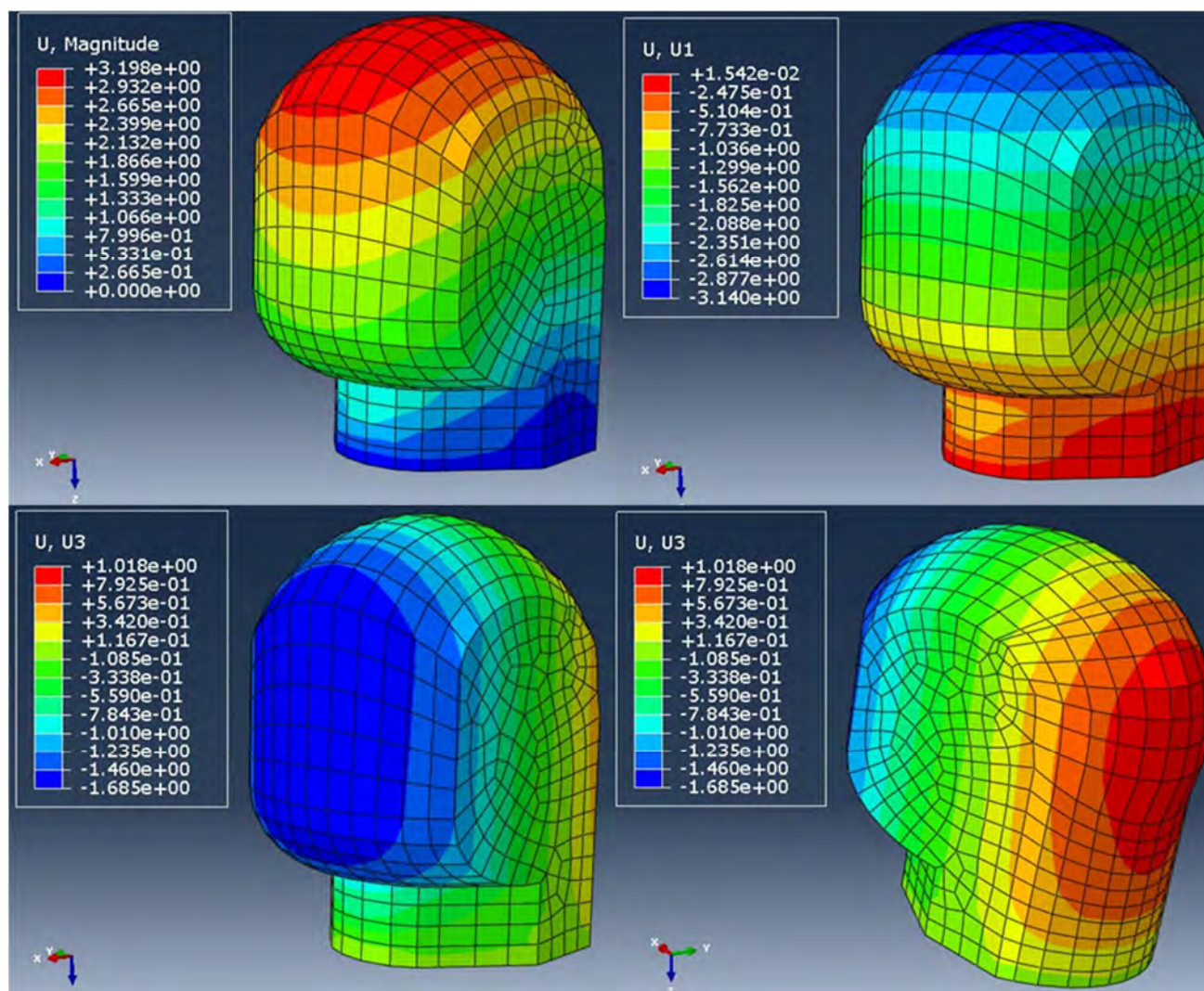


19 - Tensión interior en el ensayo de cabeza con explosión frontal

Se aprecia como las tensiones se van disipando a medida que avanzamos por nuestra estructura. Cada vez, las moléculas de material van ofreciendo más resistencia hasta que detienen la deformación y con ella la tensión interna.

Además también podemos observar como la mayoría de las tensiones altas se quedan en la superficie, entrando internamente una magnitud más pequeña de las mismas, lo que generará menores daños internos.

Una vez estudiado que sucede con las tensiones, pasamos a analizar las deformaciones y en concreto, los desplazamientos producidos en nuestra figura.



20 - Desplazamientos en el ensayo de cabeza con explosión frontal

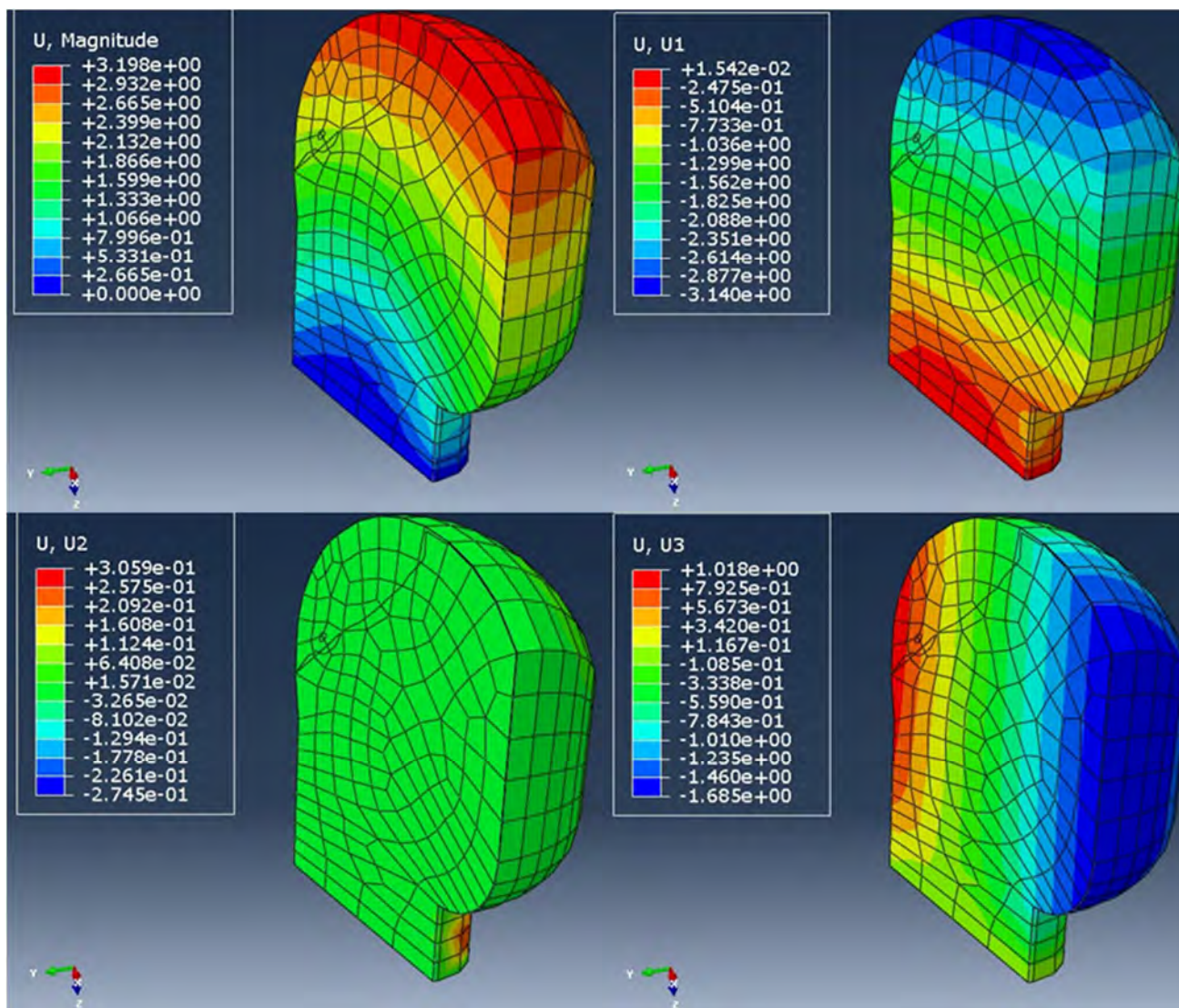
En un principio lo estudiamos en magnitud y después descomponemos según las componentes de dirección de la misma.

Las deformaciones se producen en los 3 ejes pero en mayor magnitud en el eje X, en concreto en dirección negativa. La parte superior de la cabeza se desplaza hacia atrás debido al momento que se crea en el extremo más alejado del empotramiento.

El desplazamiento en el eje Z no es sino resultado del que se ha producido en el eje X, ya que la propia estructura del material, hace que si los nodos de la parte alta de la cabeza se desplazan hacia atrás, esos mismos nodos también se desplacen en dirección Z positiva hacia abajo.

El desplazamiento en el eje Y, como veremos a continuación, es prácticamente despreciable.

De nuevo realizamos el corte para ver cómo se mueven estas deformaciones de una manera interna.



21 - Desplazamientos internos en el ensayo de cabeza con explosión frontal

Poca información nos añade en este caso el corte, ya que al no ser una deformación que genere perforación en la estructura, no se aprecia nada irregular.

6.1.2. Lateral sin casco

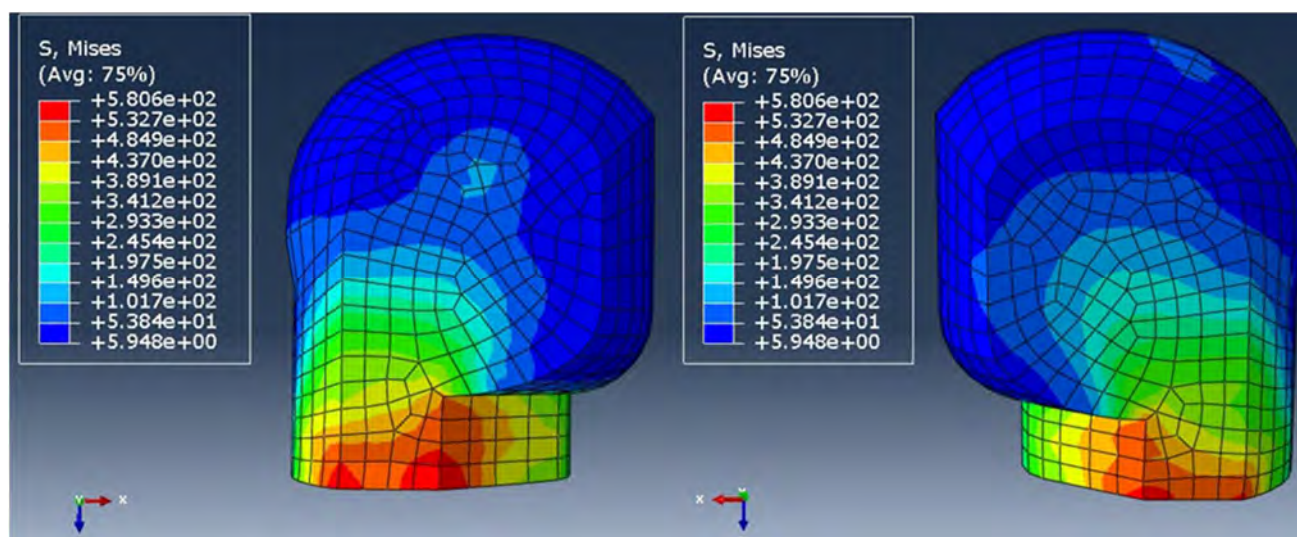
Segundo caso a simular para el diseño de la cabeza.

En este caso las condiciones serán similares, la carga explosiva, también de 1Kg de TNT, se encuentra a 150mm del centro de coordenadas de la cabeza, pero en este caso, el foco de la explosión se situará en el lateral derecho de la misma.

Esto situará el foco de la explosión a uno 80mm de la superficie lateral derecha de la cabeza de nuestro dumie.

No haremos la simulación del lateral izquierdo ya que, al tratarse de una estructura simétrica por el plano YZ, los resultados serán los mismos que los obtenidos en este apartado pero con signos contrarios.

Usamos la misma metodología que en el caso anterior:



22 - Tensiones en el ensayo de cabeza con explosión lateral

Los resultados son muy similares al caso anterior. Aparecen las tensiones en el cuello generadas por el momento flector que se crea en la zona superior de la cabeza.

En este caso además, se aprecia cómo se crean tensiones también en la superficie del lateral más cercano al foco de la explosión. Son de magnitud mucho menor que las que se crean en el cuello, pero pueden provocar daño y deben ser atajadas también con diseños posteriores.

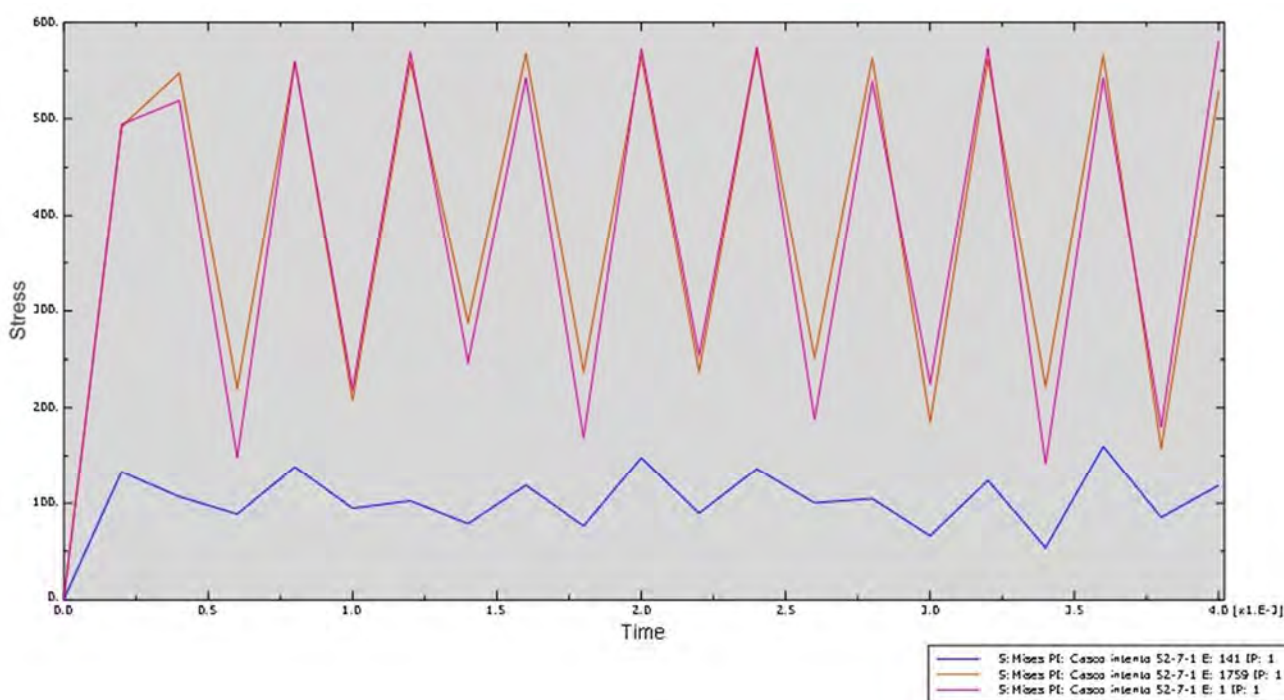
Una de las causas más grandes de lesiones de nivel moderado que pueden provocarse en la cabeza son las rotaciones fuertes recibidas por el cuello, y en consecuencia la columna vertical.

En este caso, la explosión, situada a la derecha de la cabeza, ha producido una rotación de la misma según los ejes Z y X. Esto genera tensiones en la parte más débil de la estructura, que será la que está sujeta por un empotramiento, en este caso, el cuello. Allí se acumulan las tensiones siendo el punto por donde se produciría la rotura por rotación, debido al momento que genera la explosión en la cabeza

Las dos zonas de tensión en el cuello no son iguales, y una es consecuencia de la otra. La explosión genera un momento debido a la fuerza que ejercida en un punto suficientemente alejado del apoyo, lo que hace que la cabeza rote.

Esta rotación crea una tensión de tracción en la parte izquierda del cuello haciendo que la cabeza se incline hacia el lado derecho, pero a su vez genera una tensión de compresión en el lado contrario del cuello, por el mismo proceso de inclinación de la cabeza.

Este fenómeno lo podremos observar mejor analizando individualmente un nodo de cada zona:



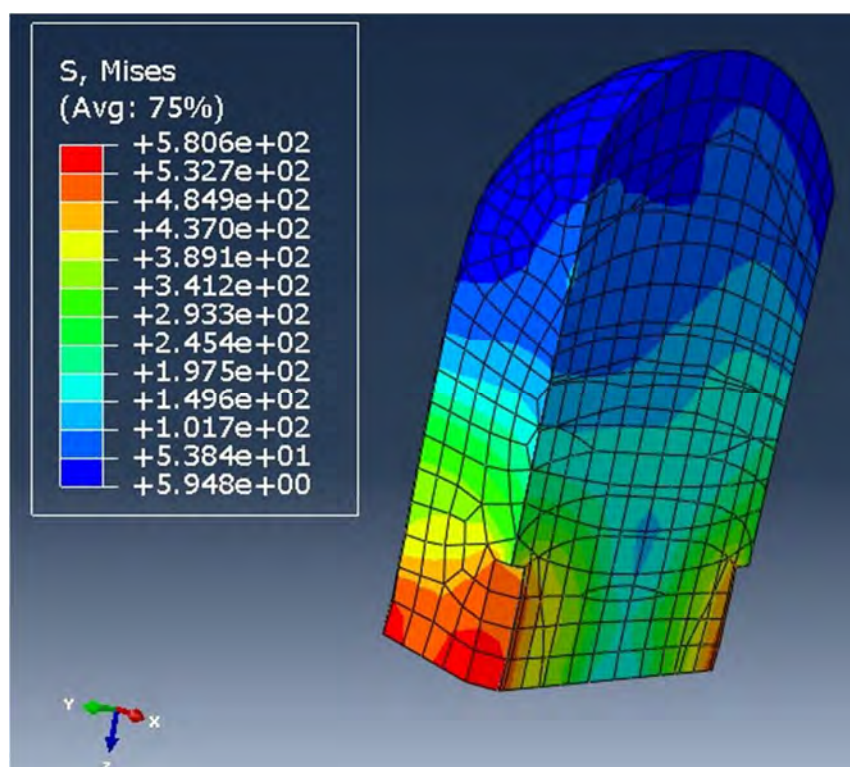
23 - Gráfica tensión/tiempo en el ensayo de cabeza con explosión lateral

La tabla muestra la tensión a lo largo del tiempo que recibe un nodo de la superficie lateral más cercana al foco y 2 nodos del cuello, una a cada lado.

La línea azul será la tensión que se crea en el nodo de la superficie lateral de la cara. Al igual que en el caso anterior, es una tensión más continua y de menor magnitud que las que se crean en el cuello.

Las tensiones del cuello tienen muchos mínimos y máximos, debido a la vibración que se crea de la rotación de la cabeza, como se explicó anteriormente. Se explica el fenómeno de tracción compresión viendo como los 2 lados suben y bajan sus tensiones a la vez, ya que cuando uno se tracciona, automáticamente el lado contrario se comprime con igual tensión pero de signo contrario, siendo en magnitud la misma. Los puntos mínimos serán las zonas en las que la cabeza recupere su verticalidad, para pandear hacia el otro lado.

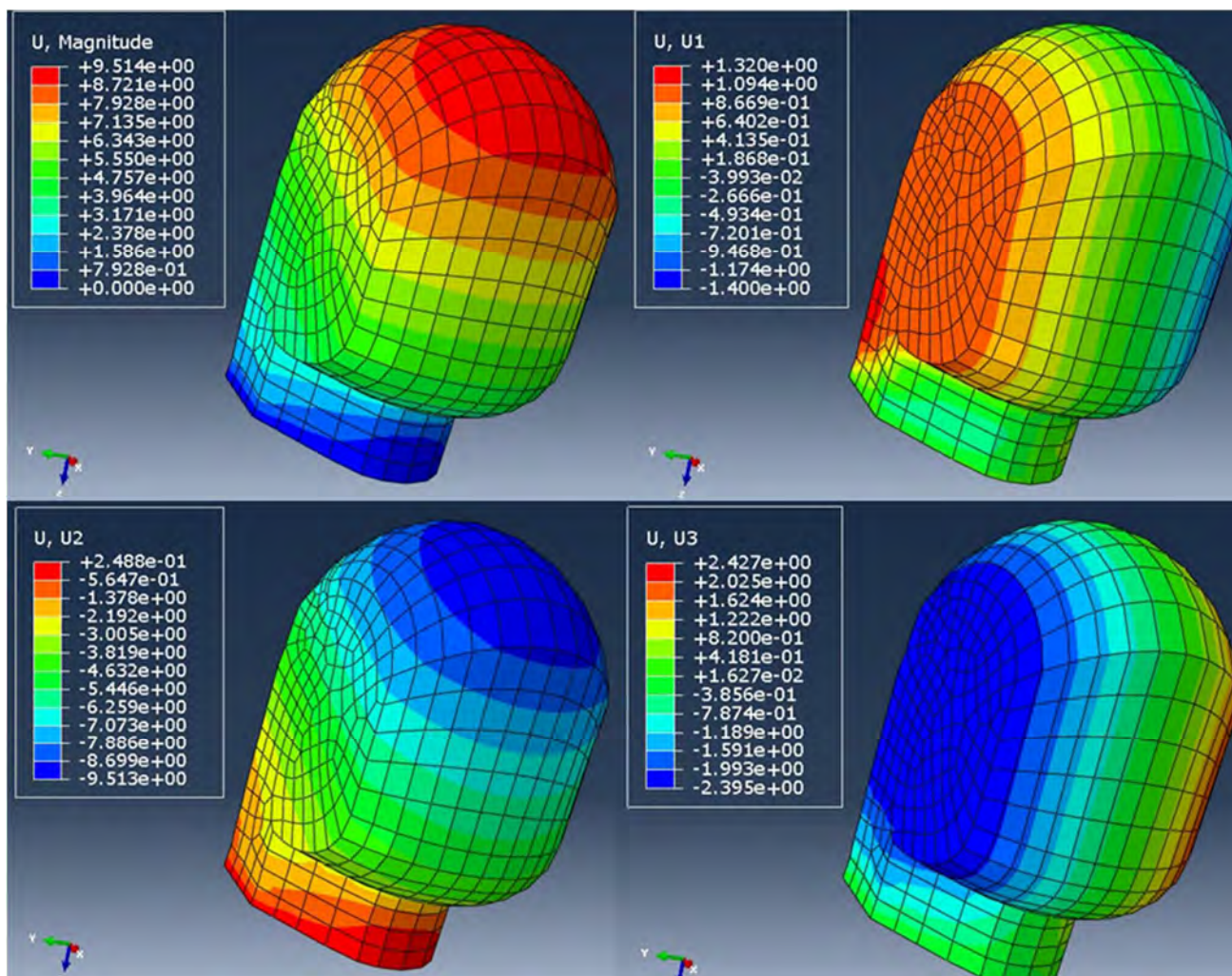
Para finalizar con el análisis de tensiones, vamos a ver que ha sucedido internamente en la figura:



24 - Tensiones internas en el ensayo de cabeza con explosión lateral

Como en el caso anterior, la tensión se disipa según entramos al interior del cuerpo macizo. Se concentran en la superficie del cuello y se disipan según internamos en la estructura.

A continuación vamos a ver lo sucedido con los desplazamientos:



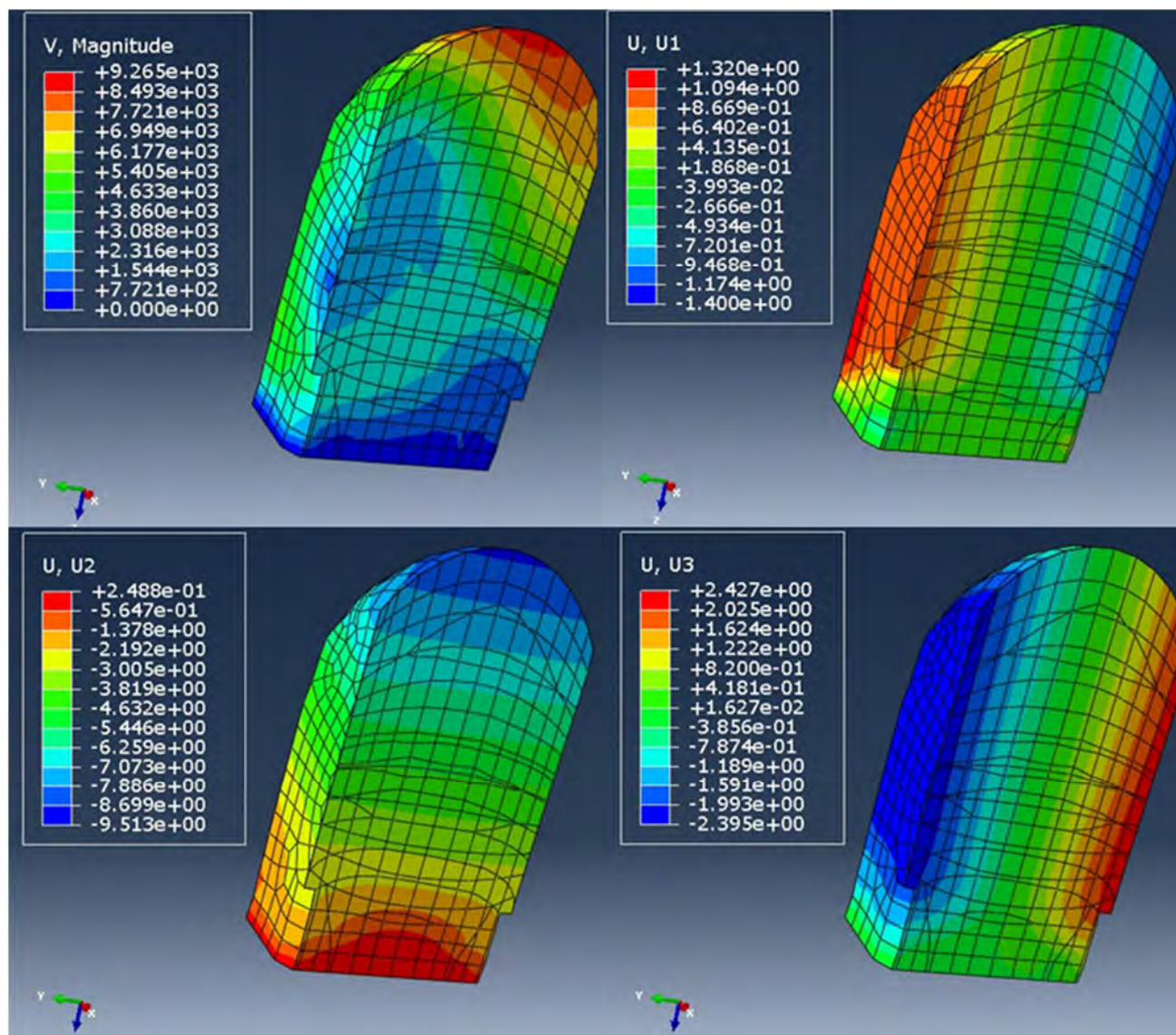
25 - Desplazamientos en el ensayo de cabeza con explosión lateral

Hemos cambiado el eje principal de la explosión. Antes el eje en el que ocurría la explosión era el X y ahora estamos trabajando en el eje Y

A esto se deben los cambios que observamos respecto al caso anterior. La deformación mayor se produce en el eje Y, en concreto dirección negativa, lo que quiere decir que el material se mueve hacia dentro de la cabeza, al igual que ocurría en el eje X en el caso anterior.

Curioso comentar como en las otras 2 direcciones se observan deformaciones contrapuestas. Estas deformaciones son mayores obviamente en el eje Z, que al igual que en el caso anterior, al rotar la cabeza, los nodos se desplazan en dirección de la onda expansiva, pero al no separarse de la estructura, también descienden. El movimiento en el eje X es debido a que la cabeza no es simétrica según el plano YX, con lo que también rotara según el eje X, aunque en menor medida.

Vamos a ver qué ha pasado a nivel interno con las deformaciones:



26 - Desplazamientos internos en el ensayo de cabeza con explosión lateral

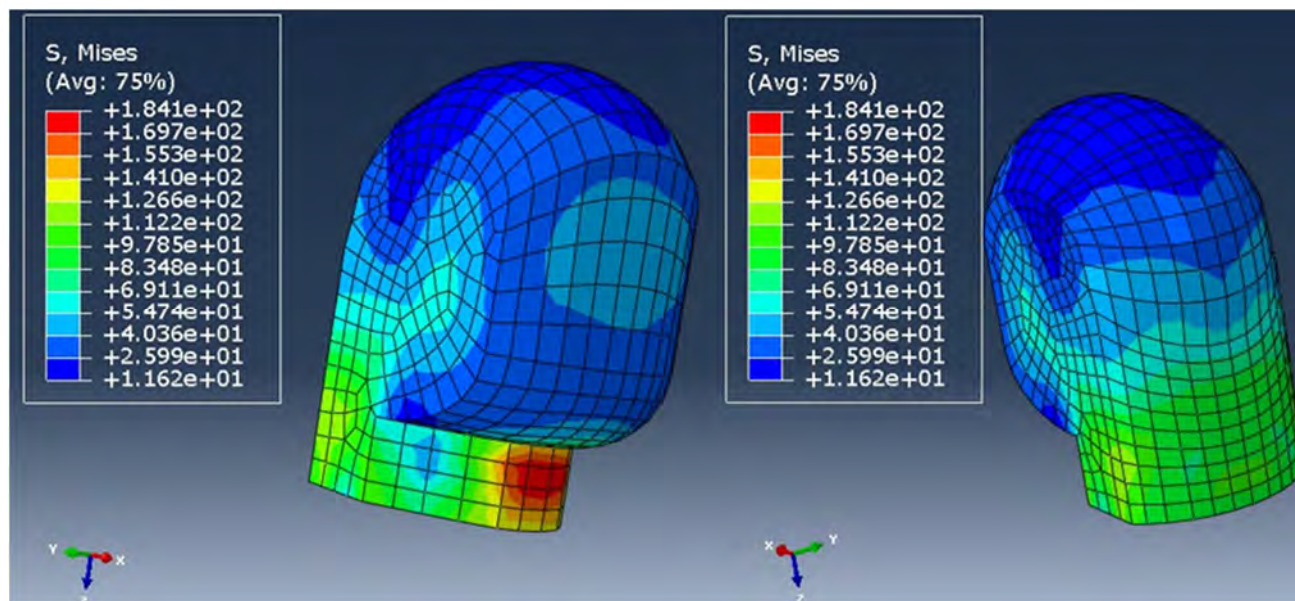
Un fenómeno que observamos también aquí es otra demostración de lo que se descubrió con las tensiones. Una componente importante de los desplazamientos se sitúa en la parte superior de la cabeza, sobre todo en dirección Y, ¿qué quiere decir esto?

Al rotar la cabeza debido al momento generado por la explosión, las partes más alejadas del empotramiento son las que más desplazamiento sufren, rotando hacia abajo. Esta parte es la parte alta de la cabeza, produciéndose altos desplazamientos en esos nodos y generando tracción y compresión a los lados del cuello.

6.1.3. Trasera sin casco

Mismas condiciones que en caso anteriores, 1Kg de TNT a 225mm del centro de coordenadas, pero en este caso, el foco lo situamos en la parte posterior de la cabeza, aproximadamente a 100mm de la superficie posterior de la misma. Se tuvo que colocar algo más lejos debido a la profundidad de la cabeza.

Procedemos a exponer los resultados que refleja la cabeza del dumie sin casco:



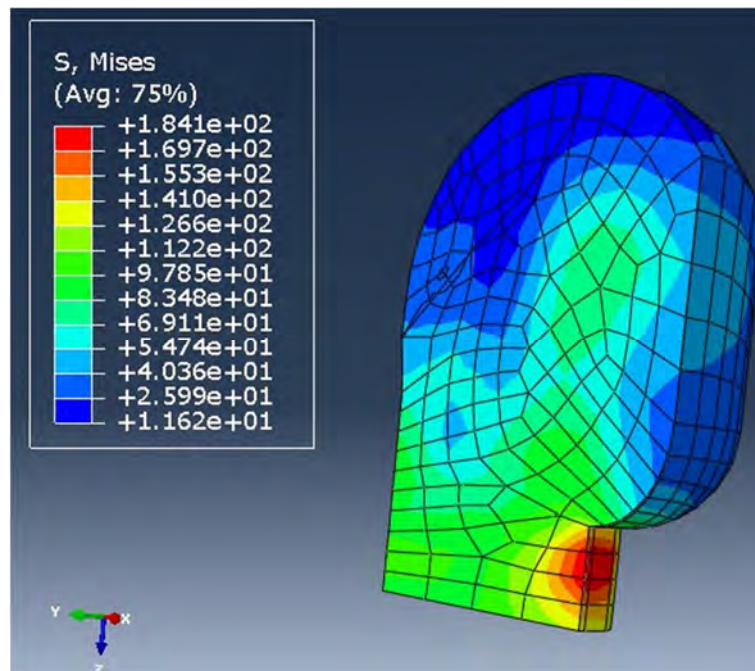
27 - Tensiones en el ensayo de cabeza con explosión trasera

Volvemos a la dirección del eje X, pero esta vez en sentido positivo con lo que las tensiones se localizaran en las mismas zonas que en el caso frontal pero donde antes eran de tracción, ahora son de compresión y viceversa.

Existe una diferencia característica, tenemos más superficie de contacto, ya que la cara tiene menos superficie que la parte trasera completa de la cabeza, es por eso por lo que la magnitud es algo menor en el caso trasero.

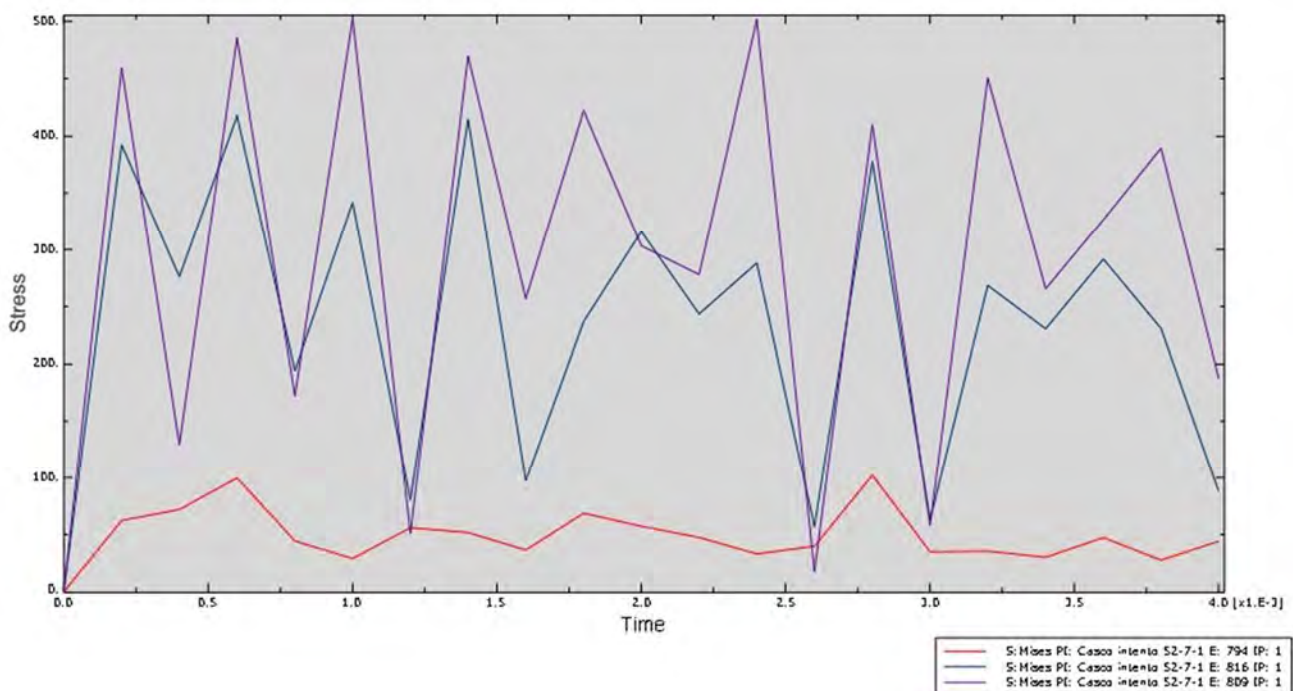
Para disminuir este daño se puede actuar de varias formas, entre ellas rebajar la carga o alejar el foco de la explosión, pero como es lógico, esas alternativas no están en nuestra mano cuando se produce un accidente y debemos proteger nuestro cuerpo.

Seguimos observando los resultados obtenidos con nuestro ensayo:



28 - Tensión interna tras el ensayo de cabeza con explosión trasera

Realizando este corte, observamos como la tensión penetra dentro de nuestra estructura sólida y se va disipando a medida que nos separamos del foco. Este dato también nos indicará en próximos ensayos, la pérdida de intensidad del daño a nuestro cerebro cuando le vallamos añadiendo componentes a nuestra protección.



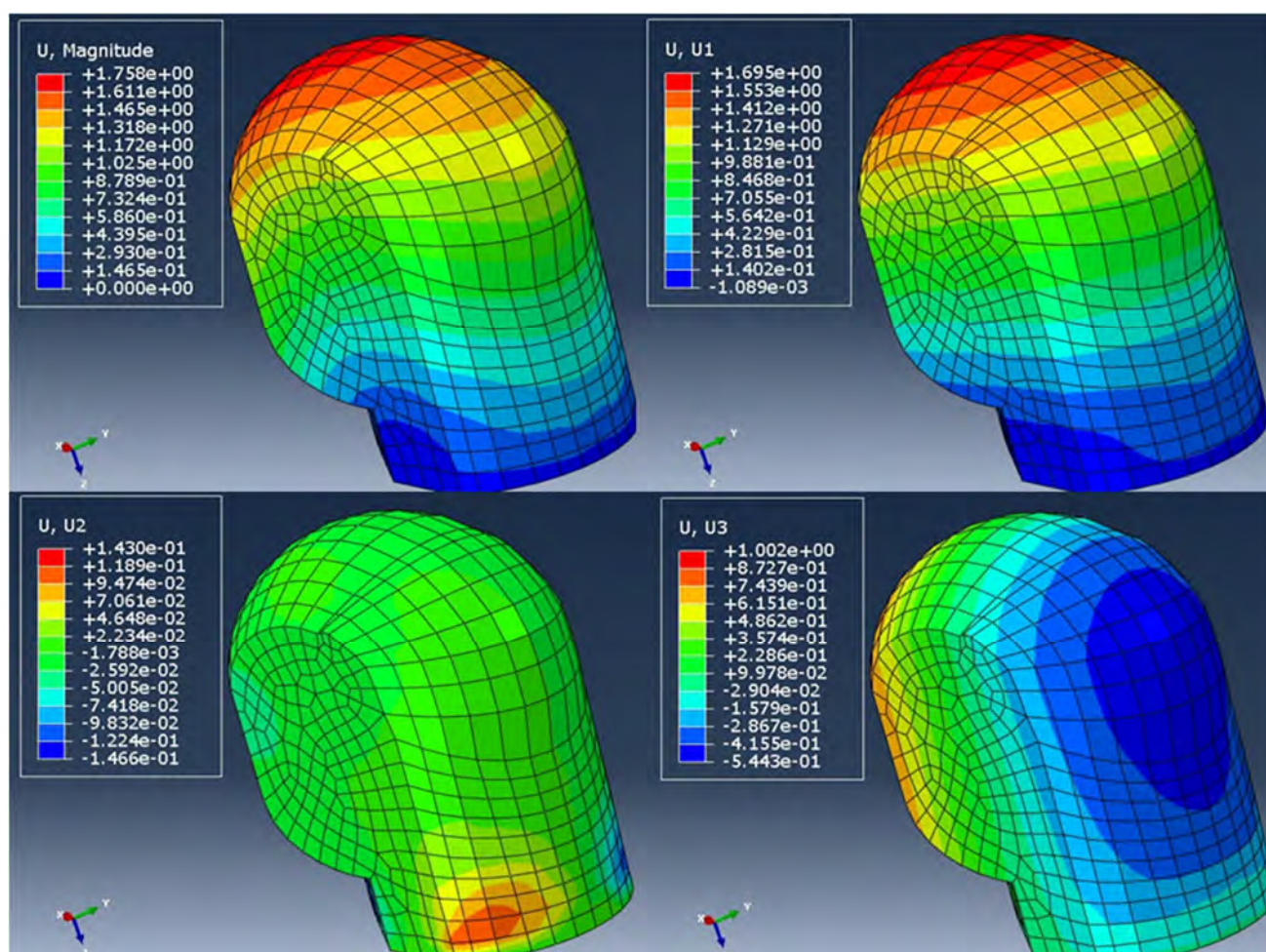
29 - Gráfica tensión/tiempo en el ensayo de cabeza con explosión trasera

En la gráfica captamos como en caso anteriores lo sucedido en un nodo de la superficie más cercana al foco de la explosión, otro del cuello y otro de la nuca.

El rojo es el de la superficie de la cabeza, no experimenta grandes cambios respecto a los otros 2 casos. Tensión relativamente continua, comparada con las otras dos, y de bastante menor magnitud que la que se genera en el cuello por rotación.

La azul y la morada serán la de la nuca y el cuello respectivamente. De nuevo observamos el proceso de resonancia y como una tracción compensa una compresión para recuperar la verticalidad y volver a rotar por inercia.

A continuación pasamos a analizar la deformación sufrida en la cabeza de nuestro Dumie.



30 - Desplazamientos en el ensayo de cabeza con explosión trasera

La componente U1 que se refiere al desplazamiento producido en dirección X de nuestro sistema cartesiano muestra el desplazamiento de la parte superior de la cabeza en dirección X, pero esta vez positiva, ya que se mueve hacia adelante.

Las componentes U2 y U3 serán respectivamente los desplazamientos que se crean en las direcciones Y y Z. Se crean dos desplazamientos contrapuestos, uno negativo y otro positivo, generados por el momento que crea respecto a esos ejes la explosión. Los desplazamientos del eje Y, en magnitud, serán mucho más pequeños que el desplazamiento que se produce en dirección X con lo que serán prácticamente despreciables.

Como ya se comentó anteriormente, los desplazamientos en el eje Z son debidos a los del eje X.

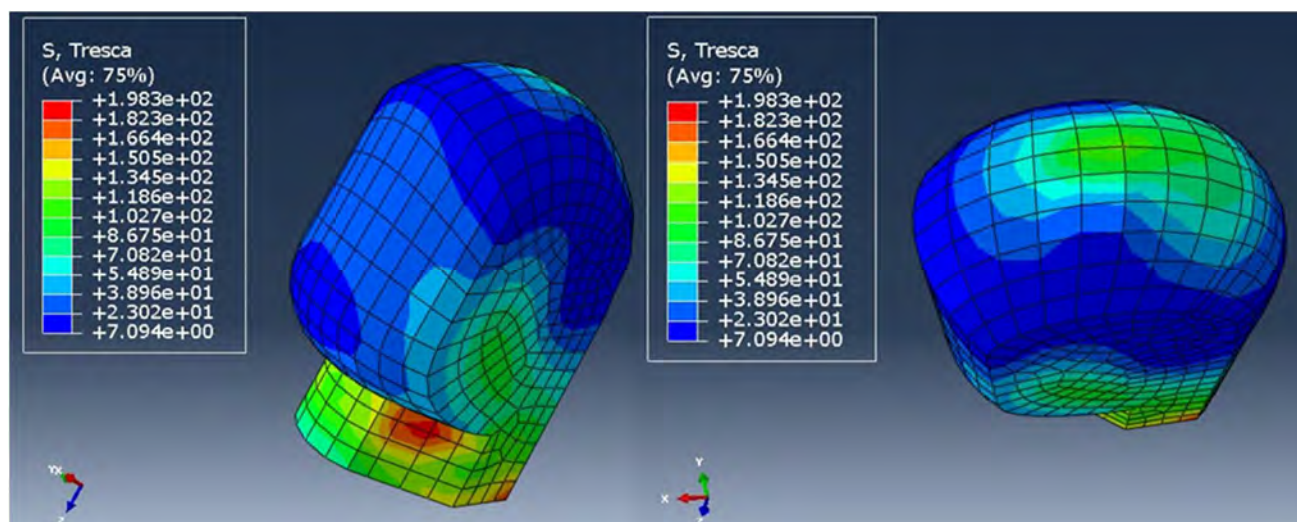
6.1.4. Superior sin casco

Por último, simularemos una explosión cuyo foco se encuentra en la parte superior de la cabeza.

Este ensayo tendrá las mismas características que los demás, 1Kg de TNT colocado a 150mm del centro de coordenadas de la cabeza. Eso querrá decir que su foco, se situara a unos 61mm de la superficie superior de la cabeza del dumie.

Al estar situado en la parte superior de la cabeza, este ensayo será especialmente peligroso ya que la gravedad será otra fuerza a contrarrestar por nuestro cuello, aumentando el daño que recibirá y teniendo así, que empeñarnos especialmente en disminuir la fuerza que recibe esta parte.

Los resultados obtenidos en este ensayo son los siguientes:



31 - Tensiones en el ensayo de cabeza con explosión superior

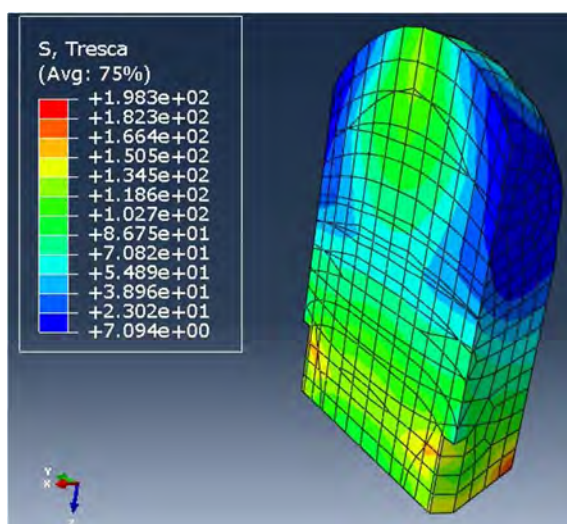
Al igual que hemos observado en el resto de ensayos, el punto más peligroso se encuentra en la zona del cuello.

En este ensayo se ve más que en ninguno la tensión creada en la superficie más cercana del foco. Entra dentro de lo lógico ya que, como dijimos anteriormente, la gravedad actúa como agravante en este caso.

Se crean más tensiones en el cuello y se crean más tensiones en la superficie superior de la cabeza aunque una cosa cambia, el foco del cuello se coloca, no en la parte más cercana al empotramiento sino justo debajo de la mandíbula.

La tensión en ese punto se incrementa al provenir la fuerza de la parte superior. Se trata de un cambio de sección en una fuerza axial, con lo que es un punto natural de concentración de tensiones de compresión, que son las que se ejercen en este ensayo.

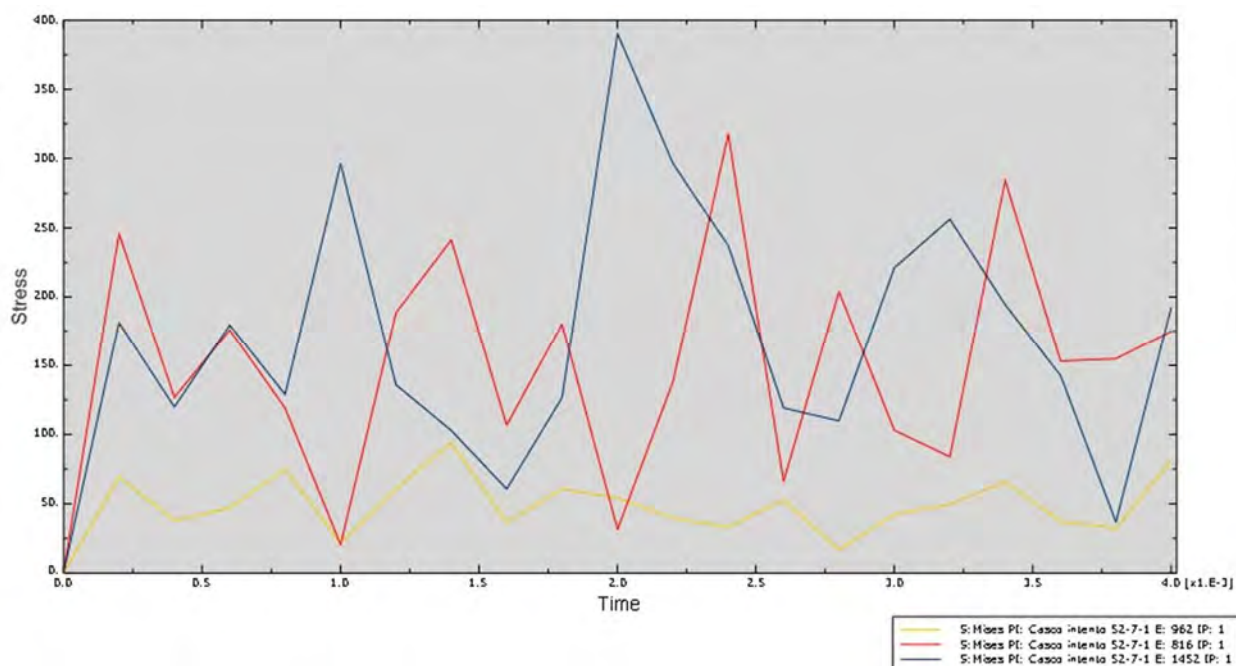
Otro dato interesante será comprobar cuanto ha “profundizado” la tensión que llega a la superficie de la cabeza. Esto lo veremos realizando un corte en la misma:



32 - Tensiones internas en el ensayo de cabeza con explosión superior

Como observamos, la tensión llegó más profunda que en otros casos, pese a ser menos magnitud. Ya comentamos anteriormente que la gravedad ejercerá a la contra en este ensayo y provocará este tipo de situaciones, por eso es por lo que el diseño enfocado a esta zona debe ser muy efectivo.

Por último, en lo que a tensiones se refiere, observemos que ha sucedido en un nodo de la zona de máxima incidencia de la onda expansiva y en otros 2 situados en el cuello.



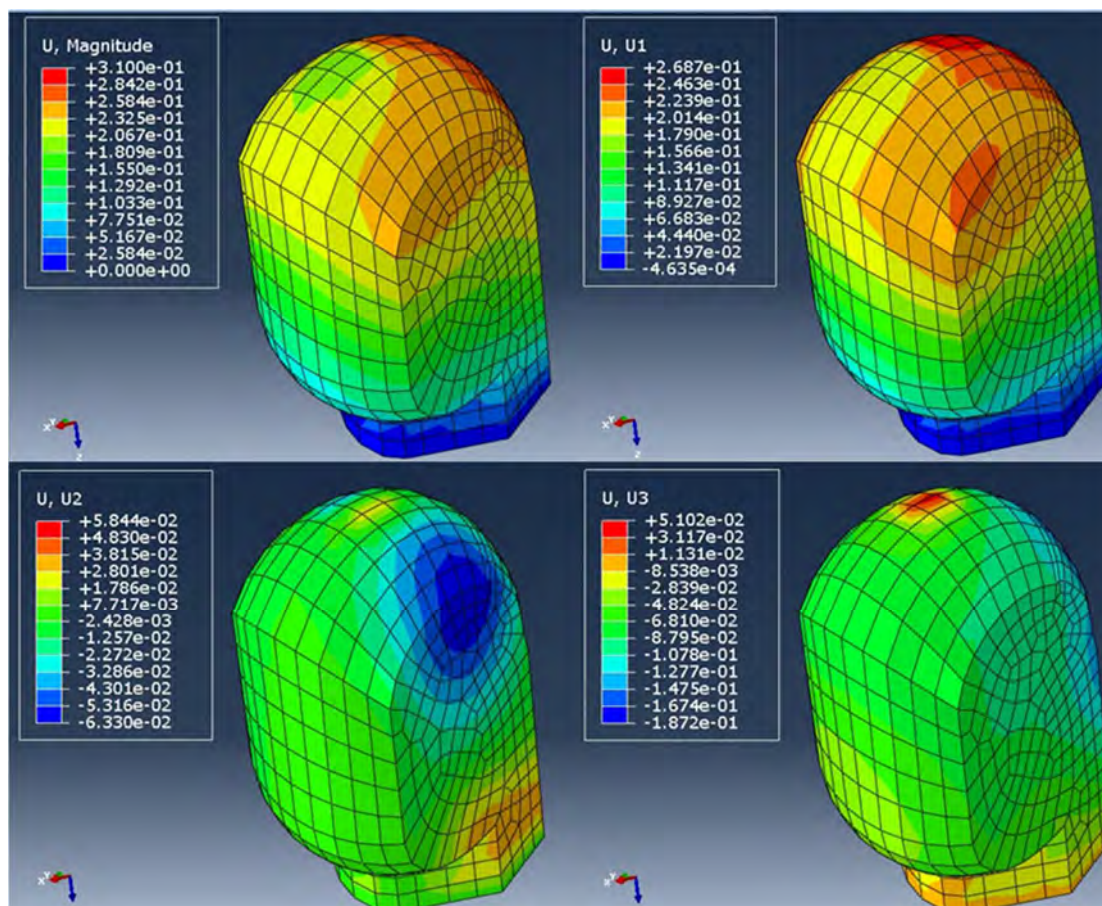
33 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo de cabeza con explosión superior

La gráfica es muy similar a los casos anteriores pero marca diferencias. La línea amarilla, que pertenece al nodo situado en la parte superior de la cabeza, tiene una magnitud más cercana a las del cuello que en otros casos, ya que es mayor que antes.

La línea azul muestra lo sucedido en el cuello, justo debajo de la barbilla. Se rompe el movimiento armónico que tenía la cabeza en otros casos. Antes, la dirección de la fuerza era perpendicular a la normal de la superficie del empotramiento, pero en este caso sigue la misma línea, solo genera tensiones axiales y existen cambios de sección, lo que hace las tensiones más irregulares ya que son 2 las secciones que intervienen y la resonancia se produce descontrolada. No es un pandeo normal sino que es más una vibración descontrolada.

La línea roja que representa un nodo de la nuca, algunas veces tiene la tensión paralela a la del cuello y otras veces justo la contraria, no van acompañadas porque la estructura se mueve en el eje X y los momentos se crean según se incline hacia un lado y hacia otro.

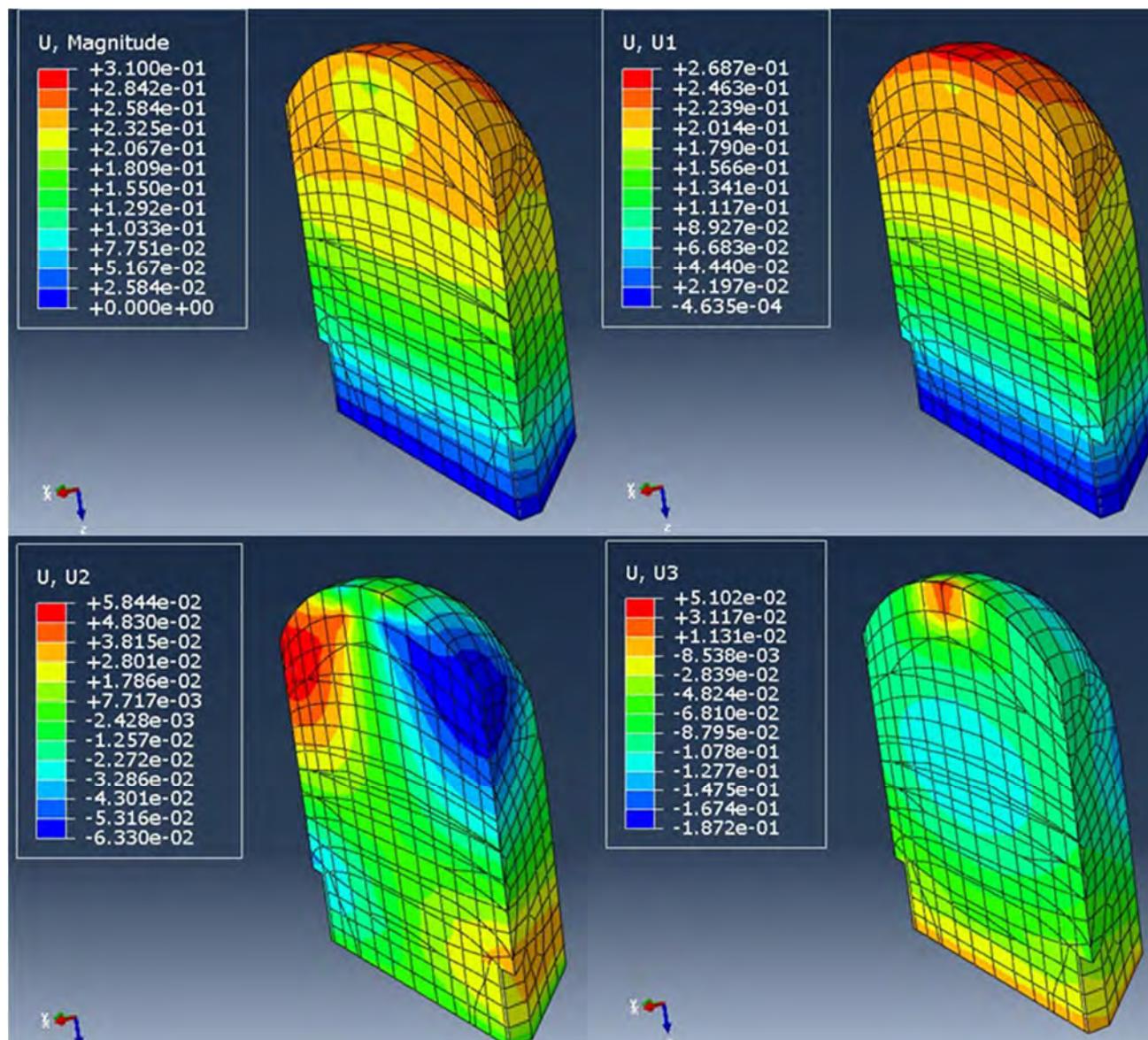
Debido a este fenómeno, será más interesante que en otros caso aun estudiar los desplazamientos que se producen:



34 - Desplazamientos en el ensayo de cabeza con explosión superior

El aumento de la tensión en el punto superior respecto a las equivalentes de otros ensayos muestra como el material se ha deformado y penetrando dentro de la cabeza, en dirección Z positiva.

El resto de desplazamientos son de orden menor y se producen por los desequilibrios que genera el cambio de sección y la no simetría de la cabeza.



35 - Desplazamientos internos del ensayo de cabeza con explosión superior

Según los desplazamientos, la cabeza se ha deformando en el punto de contacto, penetrando el material y creando un agujero, se inclinó hacia adelante y roto según el eje Z. Todo esto, en pequeña magnitud, casi despreciable.

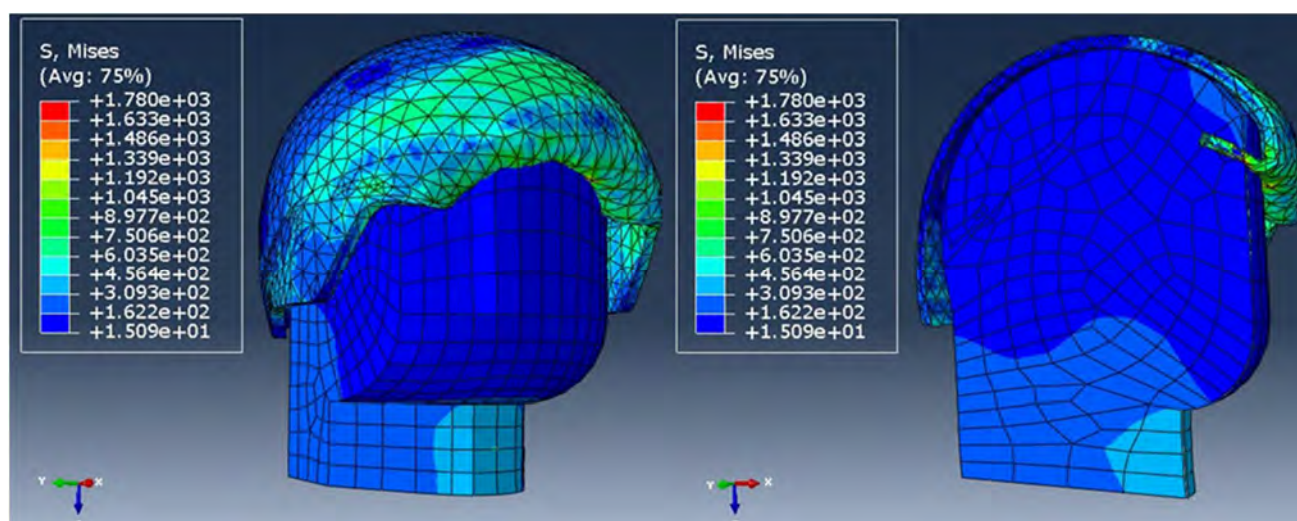
6.2. SEGUNDO ENSAYO, CON CASCO

Una vez obtenemos los resultados de los primeros ensayos, le añadimos a nuestra cabeza una protección simple, un casco sin acolchados que la protegerá de una forma primaria del daño de la explosión.

Los ensayos serán los mismos que en el caso anterior, en las mismas posiciones y con la misma intensidad.

6.2.1. Frontal con casco

Para este ensayo utilizamos las mismas características que en el ensayo frontal sin casco pero obviamente, se lo añadimos y le damos una condición de contacto con la cabeza para que no se separe. Obtenemos los siguientes resultados:



36 - Tensiones del ensayo con casco y explosión frontal

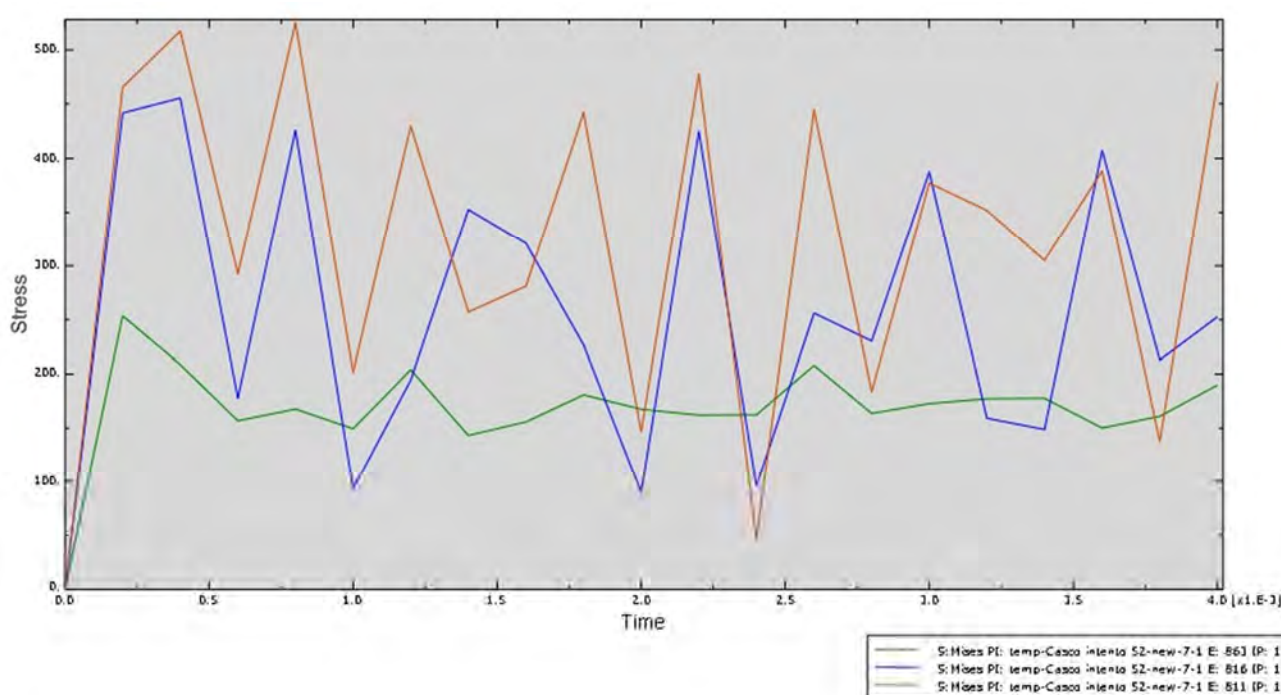
La imagen muestra el instante final de la simulación, gracias a la gráfica podremos ver cómo evolucionan las tensiones a lo largo de todo el ensayo.

Se aprecian varias cosas a primera vista. Primera y más característica, el casco se ha doblado y penetrado dentro de la cabeza. Esto nos indica una opción nueva para el diseño, añadir estructuras de refuerzo en los bordes para evitar que se deformen y puedan causar daño a la cabeza por penetración. Esta opción de diseño se hace colocando diferentes materiales, que puede ser una opción de estudio futura para continuar este mismo proyecto, pero por ahora, nos centraremos únicamente en modificar el diseño estructuralmente.

Otra parte característica que observamos de la simulación son las tensiones que se han creado. Casi en su mayoría, la tensión generada por la onda expansiva se ha repartido por el casco, evitando la concentración de la misma en puntos superficiales cercanos al foco, e incluso amortiguó la tensión que se creaba en el cuello en los casos en los que la cabeza estaba sola.

En contrapartida, observamos cómo se ha generado una tensión de contacto cabeza/casco, que trataremos de amortiguar con siguientes diseños.

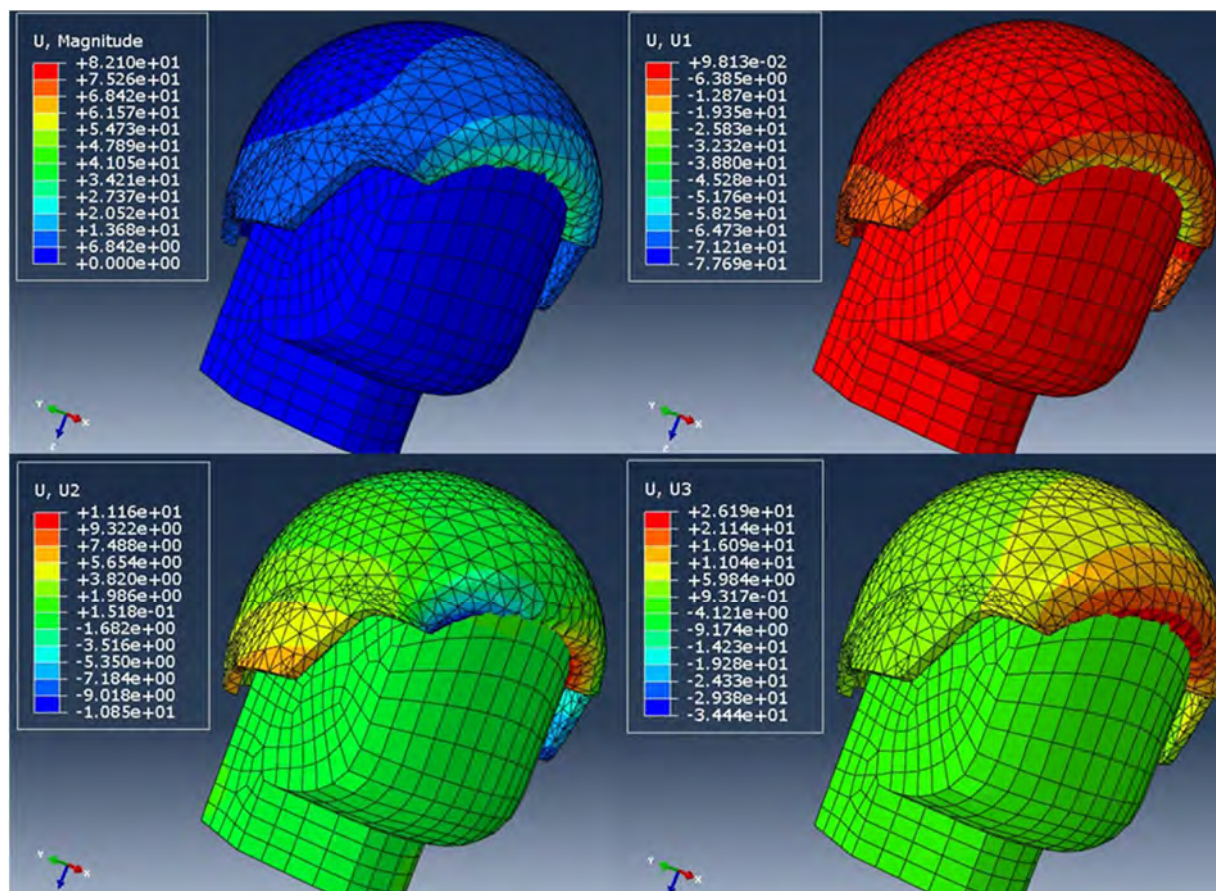
Estudiemos más detenidamente lo que ha pasado en los mismos nodos que estudiamos en el caso frontal con la cabeza sin casco:



37 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo con casco y explosión frontal

Siendo la línea verde la del nodo situado en la parte frontal, la cara. La línea azul pertenecería al nodo situado en el cuello y la naranja a un nodo en la nuca.

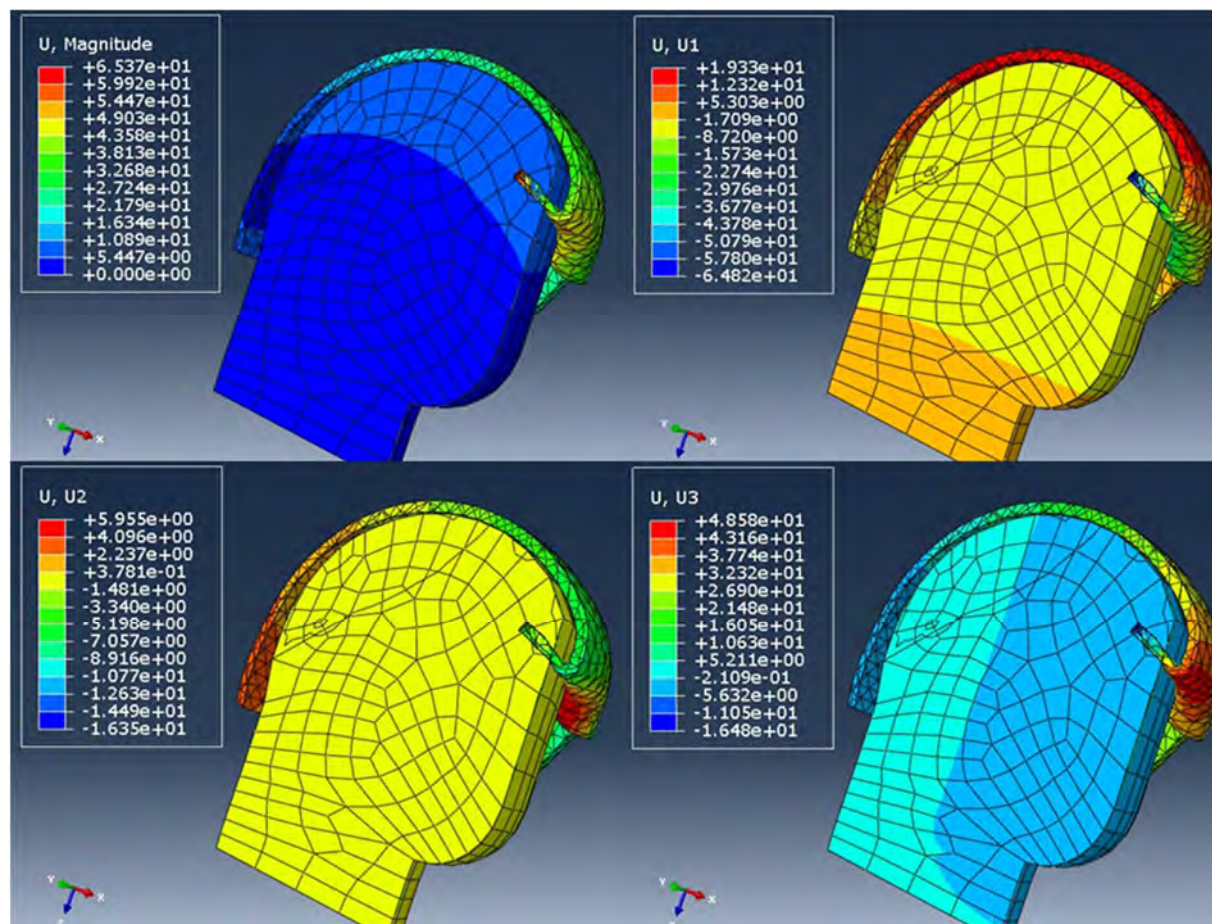
No se observan cambios característicos con respecto al caso anterior pero esto puede tener su sentido. Como observamos, la cara es la única parte desprotegida del casco, para evitar daños en esta zona y la bajada consiguiente de tensiones, tendríamos que crear una visera y un bucal que protegieran esa zona. Además esa zona debería llevar un material transparente para poder observar lo que tenemos en frente, con lo que las propiedades también cambiarían. Esta opción de diseño se planteara en proyecto adyacente al actual.



38 - Desplazamientos del ensayo con casco y explosión frontal

¿Que observamos estudiando los desplazamientos? Poco nos pueden aclarar ya que, los desplazamientos que sufre el casco, que se deforma totalmente, son mucho mayores en proporción a los que sufre la cabeza, y son muy difíciles de apreciar.

Aun así, los mayores desplazamientos que se producían en el ensayo anterior, seguirán produciéndose y en mayor medida ya que aumentamos el peso y la distancia pero no tenemos un nuevo apoyo que amortigüe la inercia del desplazamiento, con lo que se seguirán produciendo la rotación del cuello hacia atrás y el problema cervical.

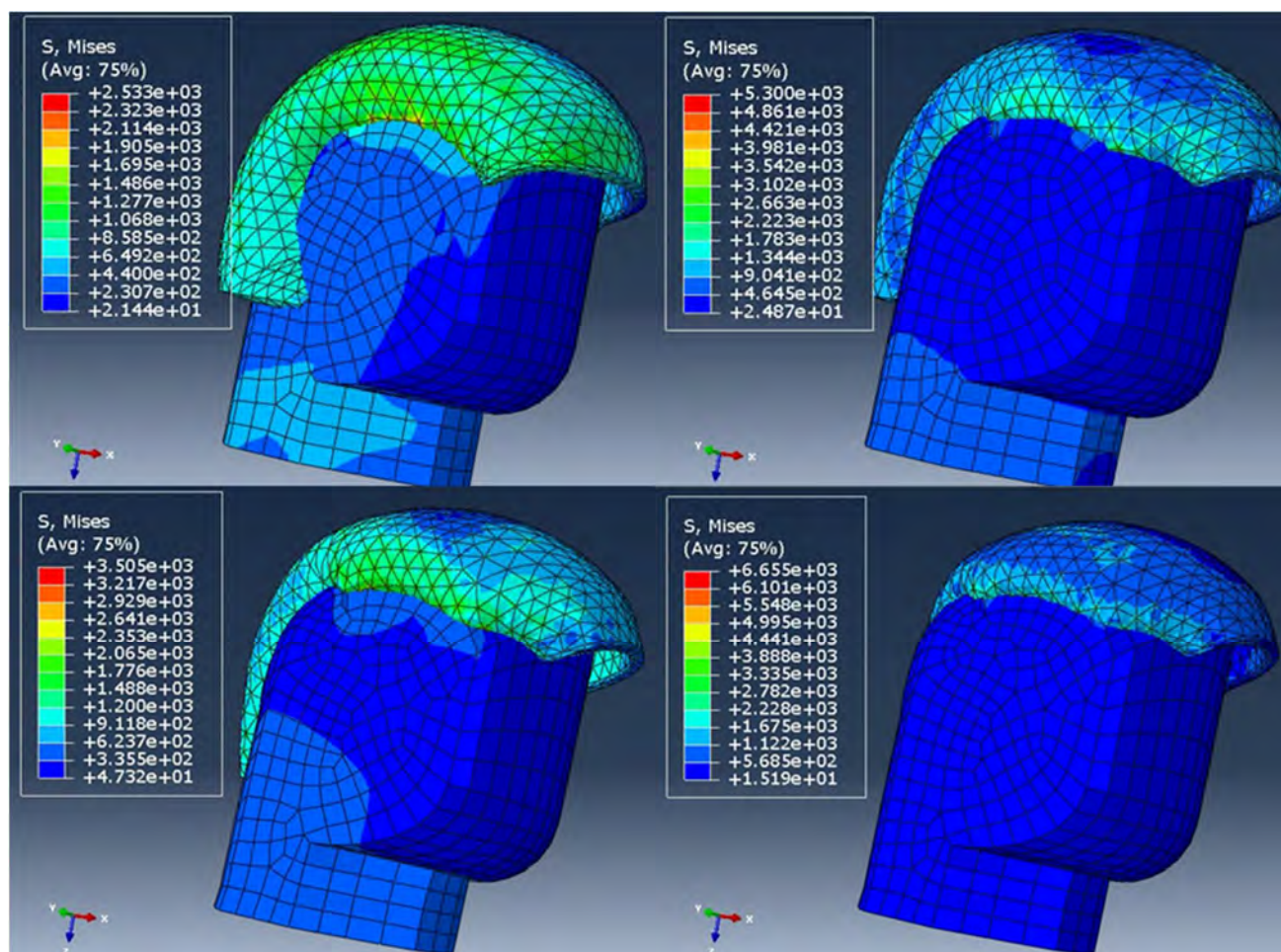


39 - Desplazamientos internos del ensayo con casco y explosión frontal

Sacamos nuevos datos que nos interesan, como las zonas por las que se deforma el casco. Esto nos puede ayudar en su diseño, reforzando estas zonas con placas amortiguadoras, o de otro material, más resistente, para impedir la deformación en estas zonas.

6.2.2. Lateral con casco

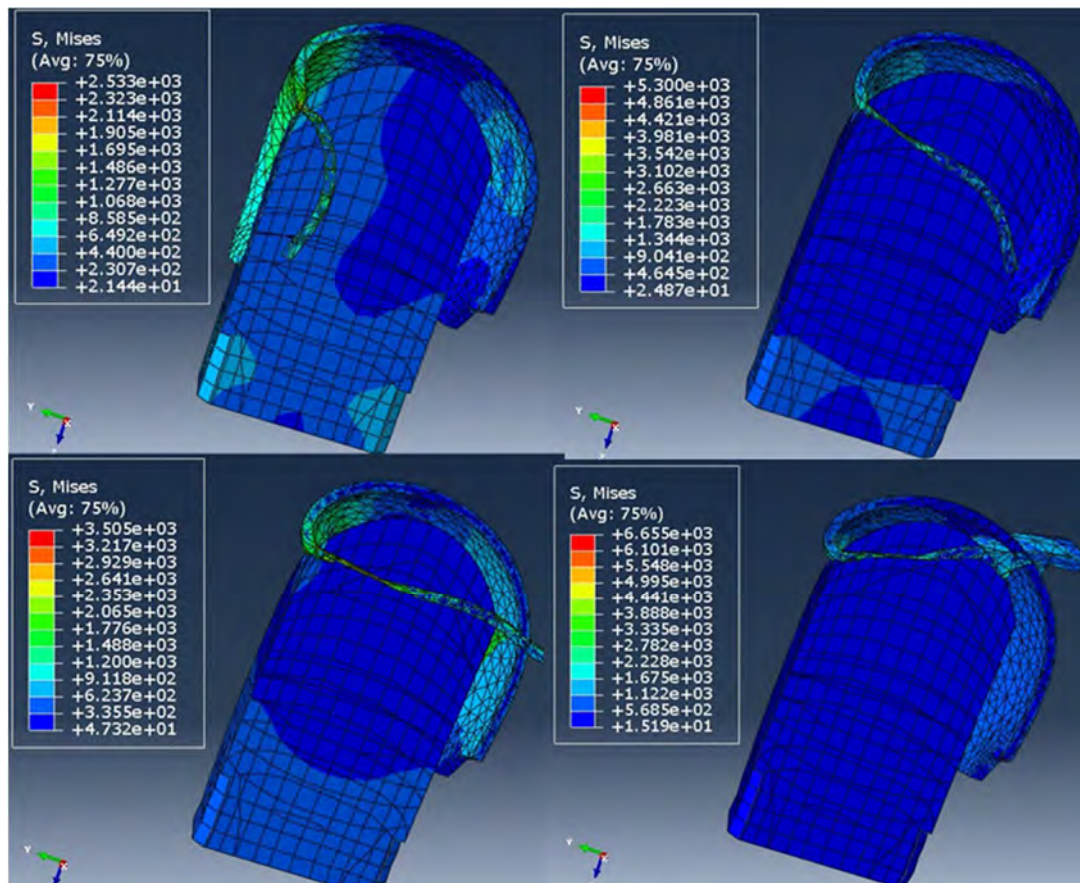
El caso lateral varía levemente respecto al caso inicial, pero tiene su porqué. Debido a la inclusión del casco, la superficie de contacto está más cerca del foco de la explosión y para poder realizar la simulación, tendremos que alejarlo. Por este motivo, el foco se encontrará a 200mm del centro de coordenadas. La carga será la misma, 1Kg.



40 - Tensiones a lo largo del ensayo con casco y explosión lateral

En este caso, se produce una deformación total del casco, penetrando lateralmente en la cabeza. No nos sería muy útil este ensayo de no ser porque descubrimos una debilidad grande de impacto lateral en el mismo, que deberíamos solucionar en posteriores diseños.

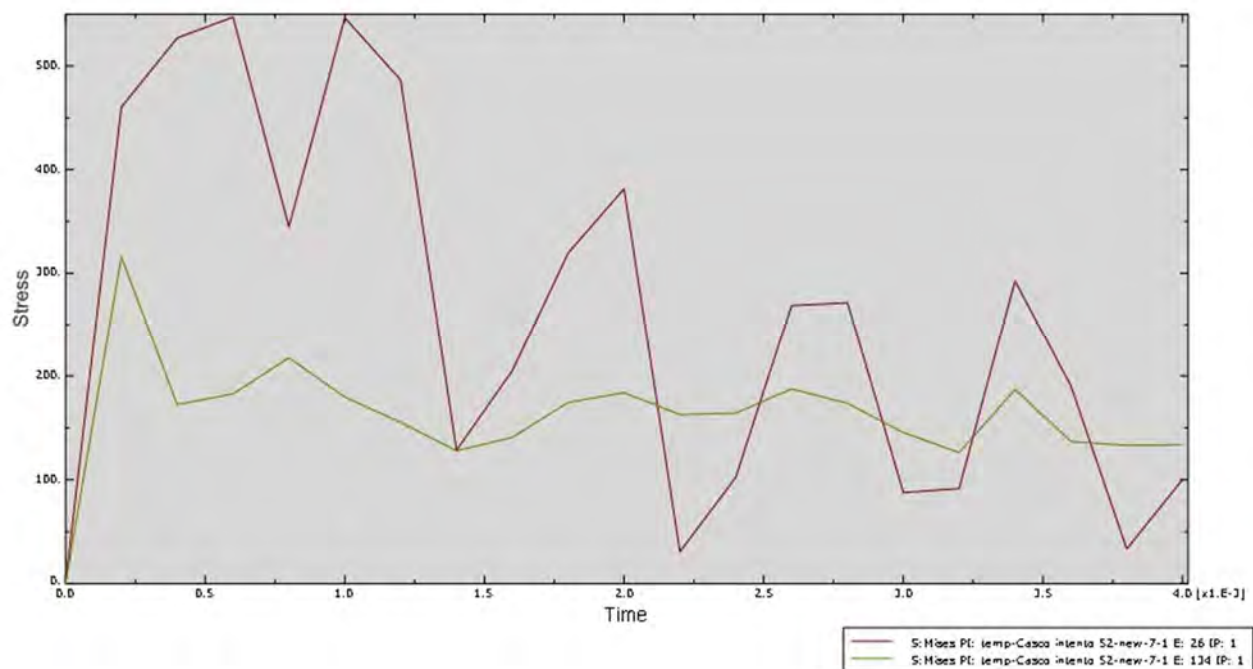
Se muestran varias etapas del proceso de ensayo para observar como la tensión en el propio casco es la que crece, mientras que la cabeza se queda más o menos en los mismo órdenes de magnitud. Está claro que el diseño debe enfocarse a amortiguar la carga del casco y evitar que se deforme para que la rotura del mismo no produzca daños añadidos a los de la propia explosión.



41 - Deformada del ensayo con casco y explosión lateral

En esta sección se observa perfectamente como el casco penetra dentro de la cabeza al deformarse, generando más tensiones que sin llevarlo, hay que amortiguar esa deformación.

Vamos a estudiar lo sucedido en la cabeza, marcamos los 3 nodos de siempre y trazamos la gráfica:



42 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo con casco y explosión lateral

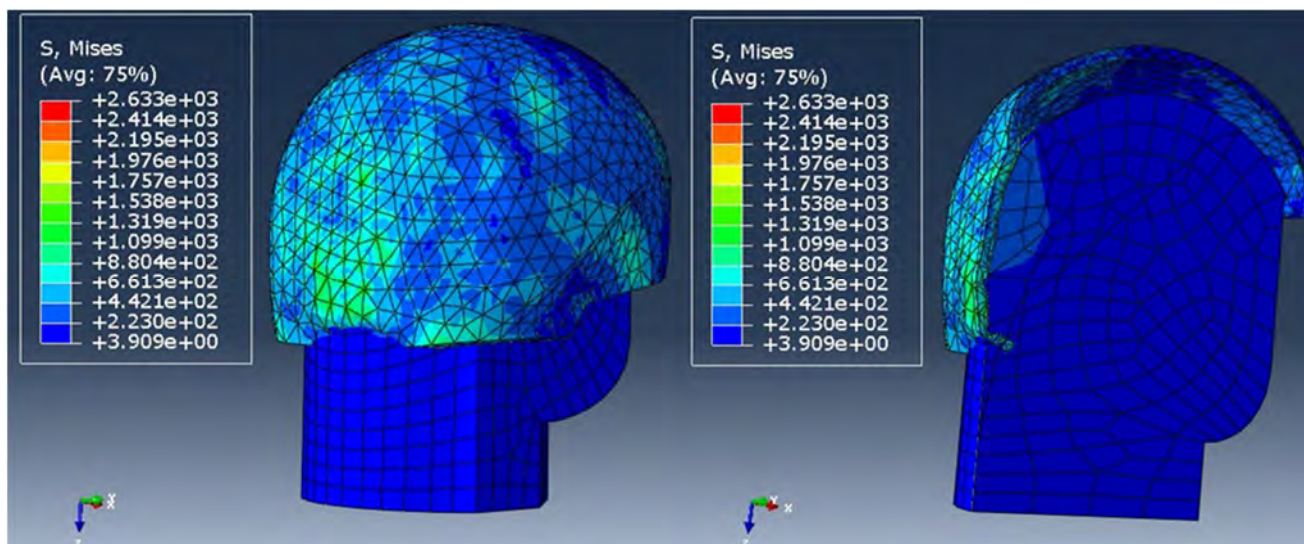
La línea roja mostrara lo que sucede en el cuello y la verde es el nodo que se encuentra en el lateral.

Esta grafica es muy similar a la anterior, la toma del nodo de la cara lateral es una tensión casi constante que va disminuyendo durante el tiempo, lo sorprendente es que la tensión que se crea en el cuello, también disminuye. Se ha logrado parar la progresión de la vibración de la cabeza añadiéndole peso lo que en parte es una mejora con respecto al caso anterior.

En este caso de estudio poco más podemos conseguir de información ya que la tremenda deformación sufrida por el casco no permite ver la deformación que presenta la cabeza.

6.2.3. Trasera con casco

Para este ensayo, situamos el foco en 225mm de distancia de la cabeza, como antes, aplicándole 1kg de masa de TNT. Al colocar el casco, la superficie se encuentra más cerca del foco, con lo que seguramente reciba mayor tensión.

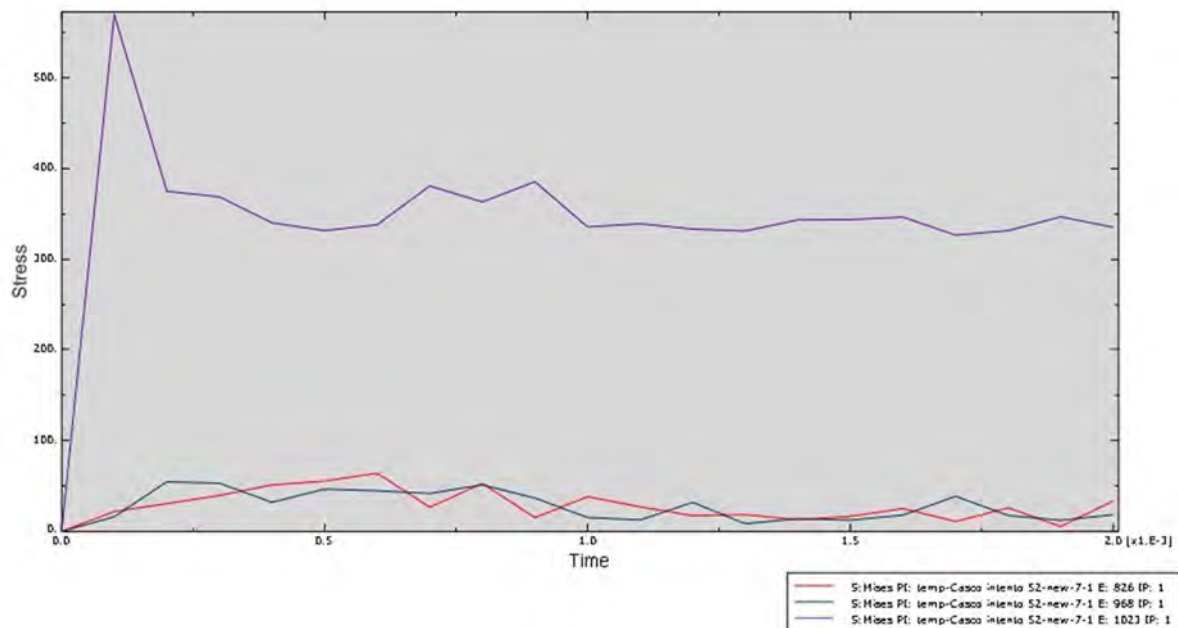


43 - Tensiones en el ensayo con casco y explosión trasera

En este ensayo sí que se aprecia bien como el casco logra amortiguar parte de las tensiones que llegaban a la cabeza. Siguen existiendo las mismas magnitudes pero la tensión se reparte más equitativamente por toda la estructura, eliminando puntos críticos del cuello y la zona que quedaba más cerca del foco de la explosión.

Por otro lado, aparece otro punto crítico, la parte de la cabeza que impacta con el casco deformado, recibe toda la tensión que se transmite a través de él, pudiendo dañar la cabeza. Posteriormente intentaremos atajar estos problemas.

Observemos lo que sucedió en los nodos de la superficie de la cabeza, la nuca y el cuello:

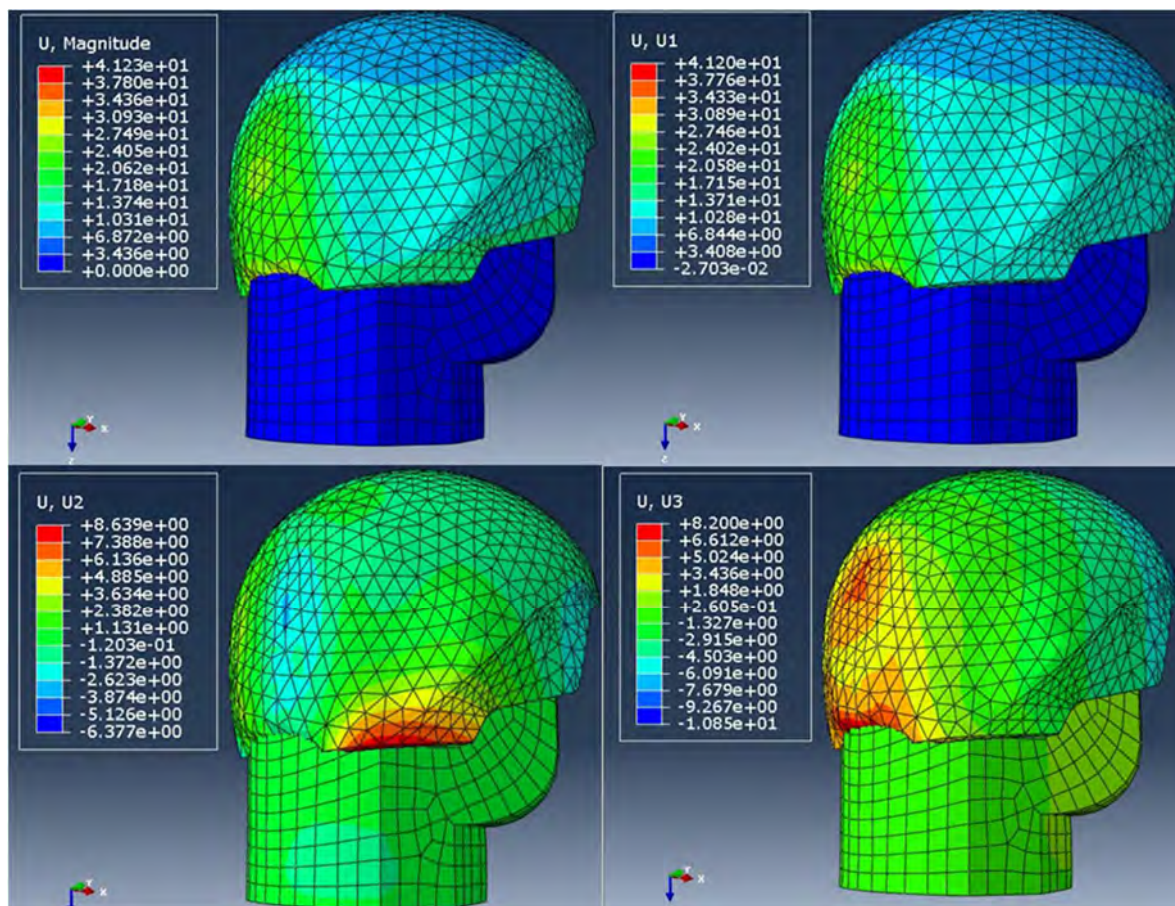


44 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo con casco y explosión trasera

Efectivamente, la tensión del cuello se amortigua ya que la explosión se reparte por el casco, evitando que se aglutine en zonas cervicales, pero aparece un nuevo problema, la zona de contacto con el casco a aumentando al nivel de magnitud de las tensiones que recibía antes el cuello.

Se ha solucionado en parte el problema pero se generó uno nuevo, amortiguar la parte de la cabeza en contacto con el casco.

A continuación analizamos como se deformó la estructura:

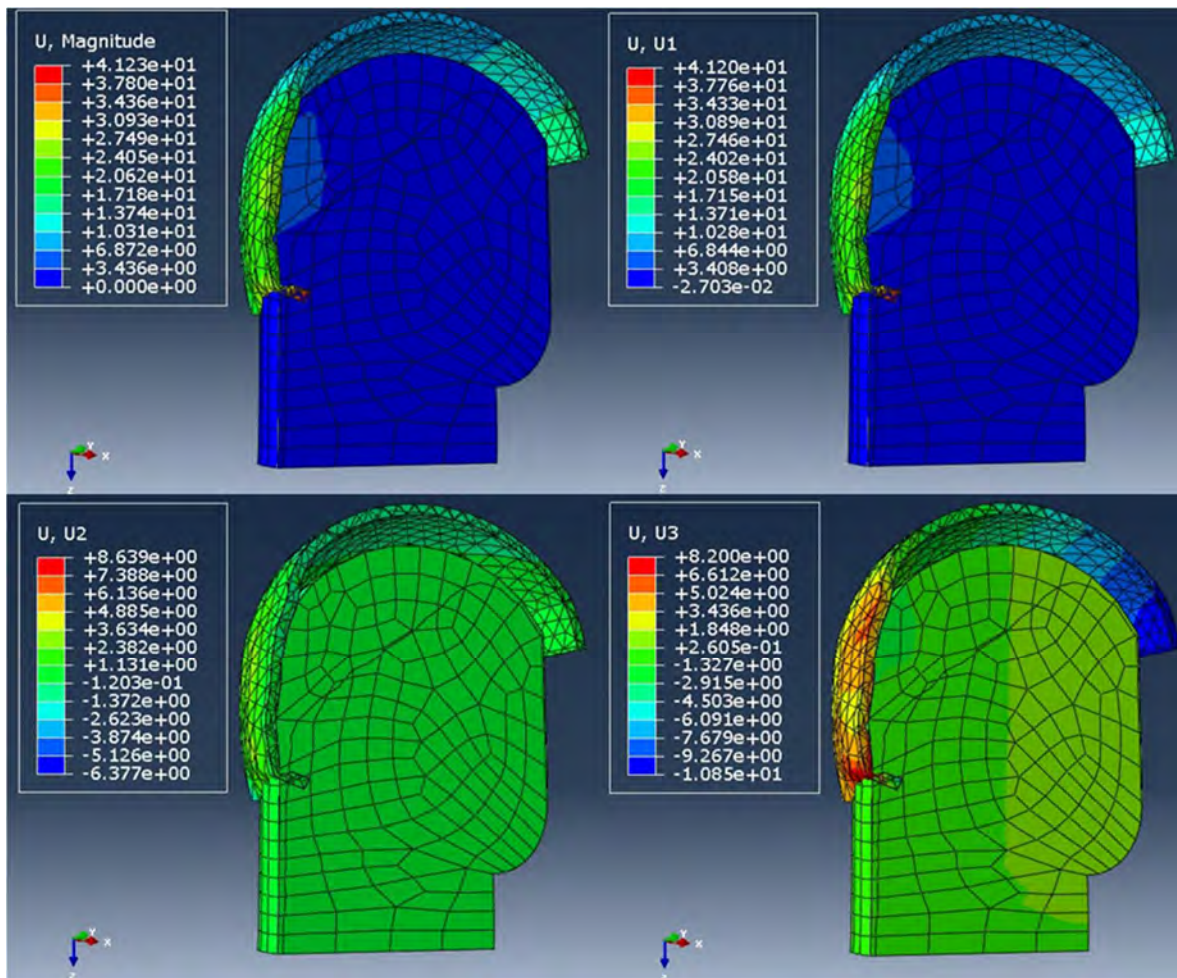


45 - Desplazamientos en el ensayo con casco y explosión trasera

Vemos cómo puede que las tensiones del cuello hayan desaparecido, pero el desplazamiento de la cabeza si se ha dado, en menor medida. El casco se deforma completamente por su parte inferior ha penetrado en la cabeza. Cómo en casos anteriores, esto lo solucionaríamos reforzando esta zona con nuevos materiales.

También se deformó la parte trasera hasta el punto de tocar con la propia cabeza. Este punto si puede resultar más crítico y tendremos que amortiguar esta zona.

Hablando de las deformaciones en diferentes ejes, la gran parte se produce en eje X, en concreto en sentido positivo, ya que es el sentido que lleva la onda expansiva. La cabeza se desplaza hacia adelante y hacia abajo como en casos anteriores. Aquí observamos además como la parte del casco más cercana al foco se deforma en dirección X bajando hacia el cuello y que los laterales del casco se abrieron en dirección Y cuando la parte de abajo se deforma hacia el interior de la cabeza.



46 - Desplazamientos internos del ensayo con casco y explosión trasera

Gracias a dividir la cabeza en 2 vemos como se ha deformado el casco hacia el interior de la cabeza. Debido a esa deformación, la parte delantera del casco subió dejando expuesta la cara.

La parte trasera se deforma en dirección X hasta llegar a impactar contra el cráneo, lo que provocó las tensiones que vimos antes.

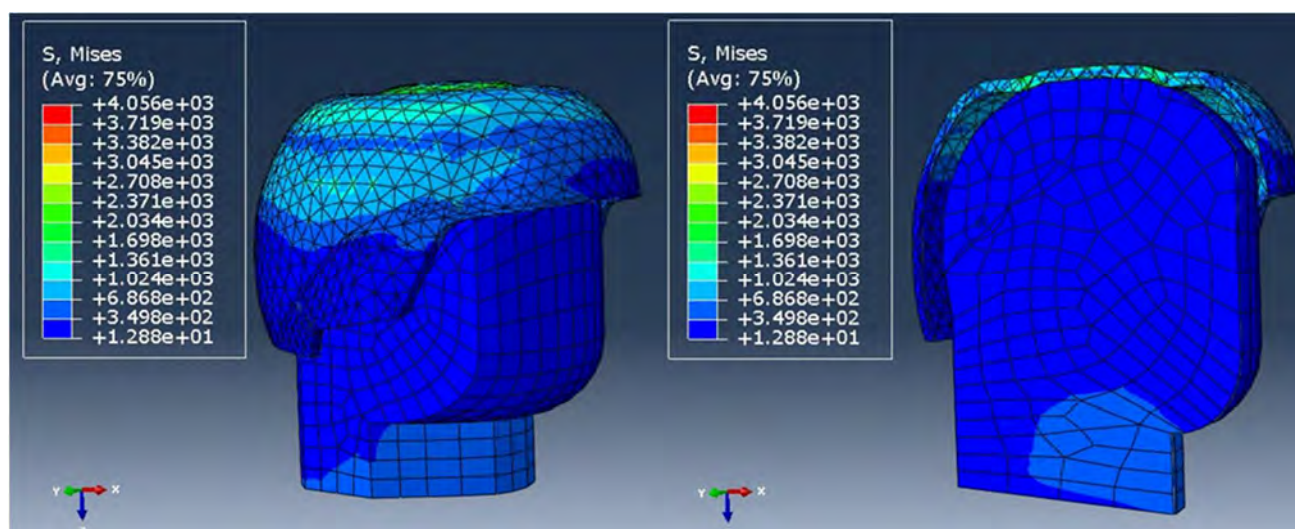
6.2.4. Superior con casco

Realizamos el último ensayo de este apartado, la explosión situada sobre la cabeza.

En este caso, como ya comentamos anteriormente, hay un factor agravante como es la gravedad, y con más motivo, ya que le estamos añadiendo un peso extra con el casco, con el que añadiremos tensiones a las ya propias generadas por la explosión.

El foco en este caso se colocará a 200mm del centro de coordenadas, un poco más alejado que en el primer caso, ya que le estamos añadiendo el casco con un grosor añadido y quedaría demasiado cerca.

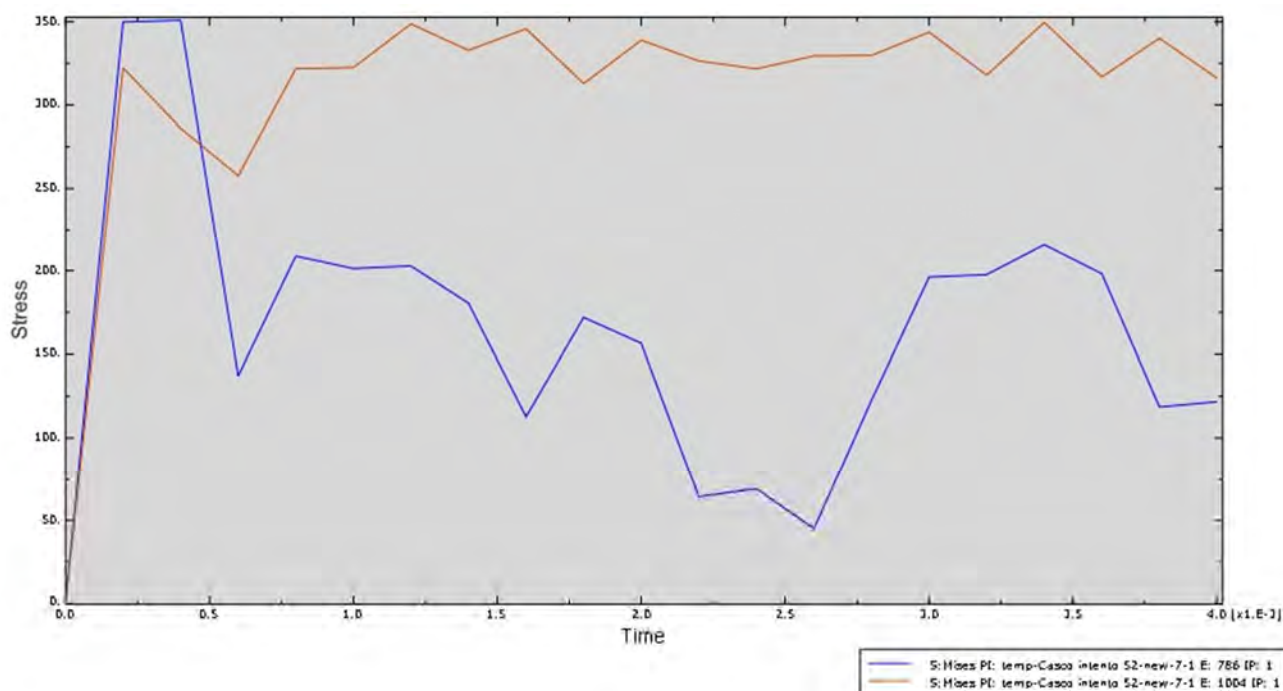
La carga de TNT será de 1Kg como en todos los demás casos.



47 - Tensiones del ensayo con casco y explosión superior

En la imagen se muestra el momento de máxima tensión que recibe el sistema. Con un primer vistazo podemos comprobar cómo el casco se deforma hasta el punto de impactar con el cráneo, transmitiéndole gran cantidad de tensión, no solo en el punto de impacto, sino al punto de apoyo, el cuello.

A continuación, gracias a la gráfica, detallaremos este suceso y veremos lo que pasó a lo largo de la simulación en la cabeza, que es lo que realmente queremos proteger.



48 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo con casco y explosión superior

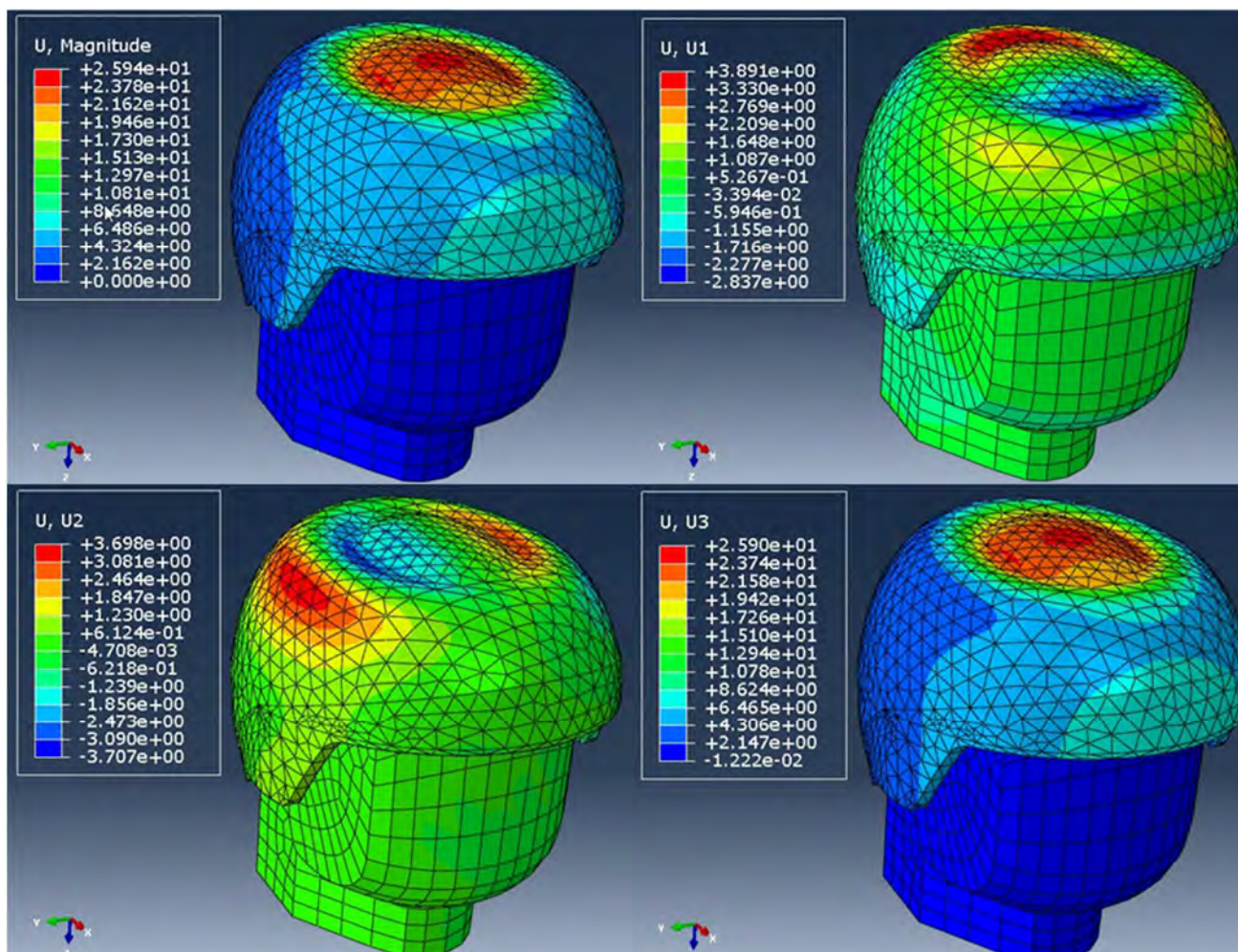
Siendo la línea naranja un nodo situado en la parte superior de la cabeza y la línea azul un nodo situado en el cuello, observamos bastante variación con respecto al caso anterior

En un primer vistazo vemos que el daño en la parte superior de la cabeza ha aumentado. Sigue llegando tensión, ya que el propio casco impacta contra ella y deberá amortiguarse de alguna manera.

Con respecto a las tensiones que recibe el cuello, también vemos que han bajado de magnitud aunque siguen siendo altas. Lo que más llama la atención en este caso es como pasamos de la irregularidad de la vibración que se creaba en el primer caso sin casco, en la que la tensión tenía mínimos y máximos indiscriminados, a tener una tensión más continua, con máximos y mínimos menos extremos.

Esto indica que la vibración ha disminuido y es menos grave. Al aumentar el peso sobre la cabeza, aumentamos la inercia, pero también aumentamos la fuerza necesaria para que el sistema entre en resonancia, con lo que las vibraciones se vuelven más suaves y constantes, aunque no dejan de ser un problema ya que mantienen una magnitud alta.

Una vez visto lo que pasa con las tensiones, vamos a ver los desplazamientos que se han producido en el sistema.



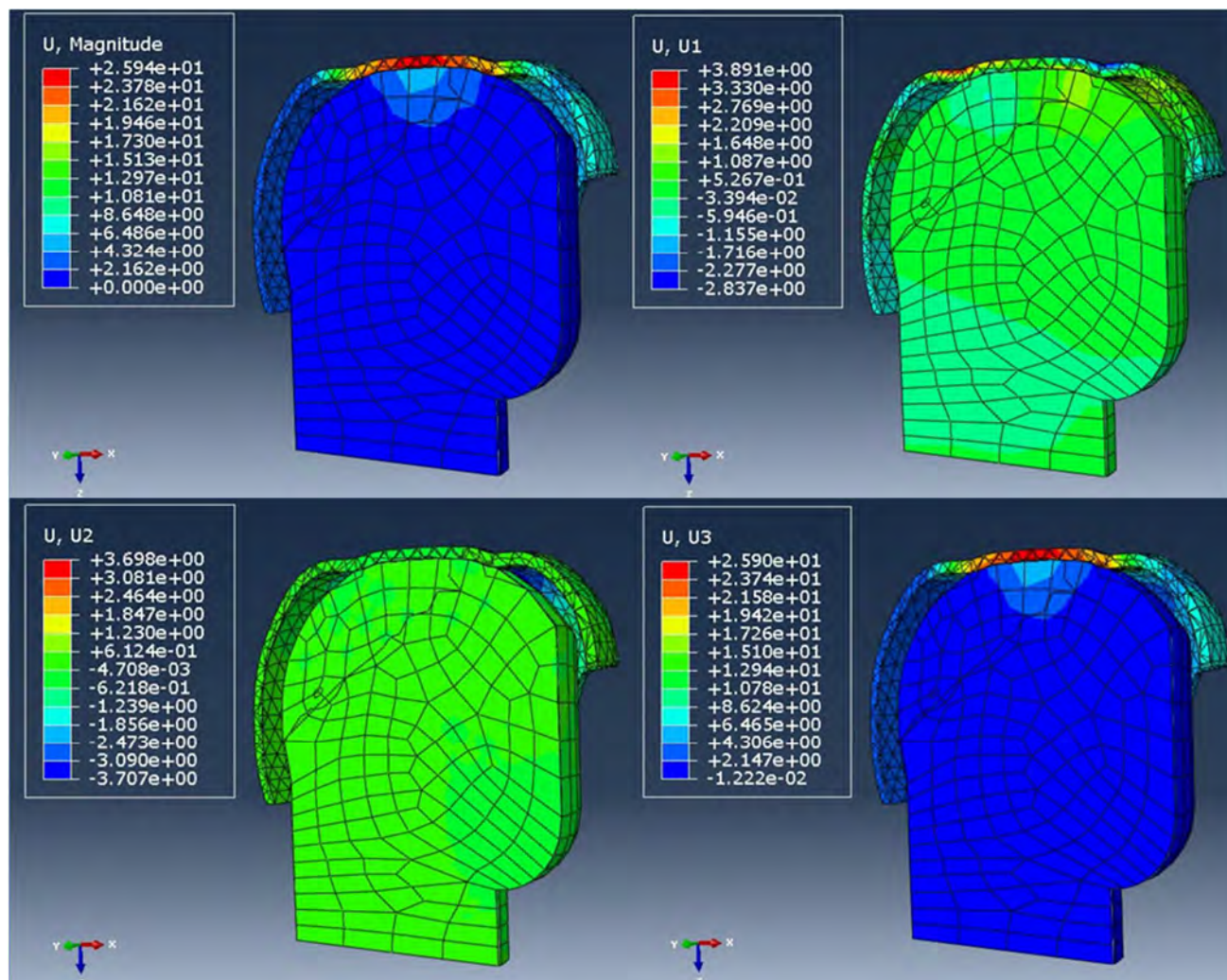
49 - Desplazamientos del ensayo con casco y explosión superior

En este caso observamos como los desplazamientos se siguen produciendo, igual que en el caso anterior.

Empezamos analizando la que se produce en el casco. El material se ha deformado en dirección del eje Z, la dirección de la onda expansiva. Esta deformación ha sido tal que ha hecho que el casco llegue a tocar directamente con la cabeza, rebote y se desplace hacia arriba a partir de ese momento, por eso los desplazamientos no son tan abundantes en el casco, aunque realmente si se producen.

En las direcciones X e Y también se producen desplazamientos en la superficie del casco, ya que la deformación inicial que se produce hacia el eje Z, desplaza material de los nodos hacia los lados, los ejes X e Y.

Para poder observar mejor los desplazamientos que se producen en la cabeza, tendremos que realizar un corte para ver lo que sucedió bajo el casco.



50 - Desplazamientos internos del ensayo con casco y explosión superior

Podemos observar como el desplazamiento que experimenta el casco, cuando contacta con la cabeza, hace que ella se deforme en la misma dirección también.

Como bueno sacamos que el desplazamiento es menor que el que se producía cuando no teníamos casco. Esto quiere decir que la cabeza se deforma menos con lo que hemos logrado amortiguar parte de la explosión.

También hemos logrado amortiguar el desplazamiento que se producía justo debajo de la barbilla, el que hacía rotar la cabeza hacia abajo. Esto puede ser debido a que el casco, al aumentar la superficie de contacto, amortiguó bastante de la onda expansiva que llegaba a la cabeza, logrando así que los desplazamientos en ella se reduzcan.

6.3. TERCER ENSAYO, CON CASCO Y ESPUMAS

Nuestro diseño puede añadir una característica de cualquier tipo de casco, las espumas que acolcharán el contacto entre el casco y la cabeza.

Estas espumas harán de amortiguación entre el casco, que será el que reciba la tensión inicial de la explosión, y la cabeza, haciendo que esta reciba mucha menor cantidad de tensión proveniente de la explosión.

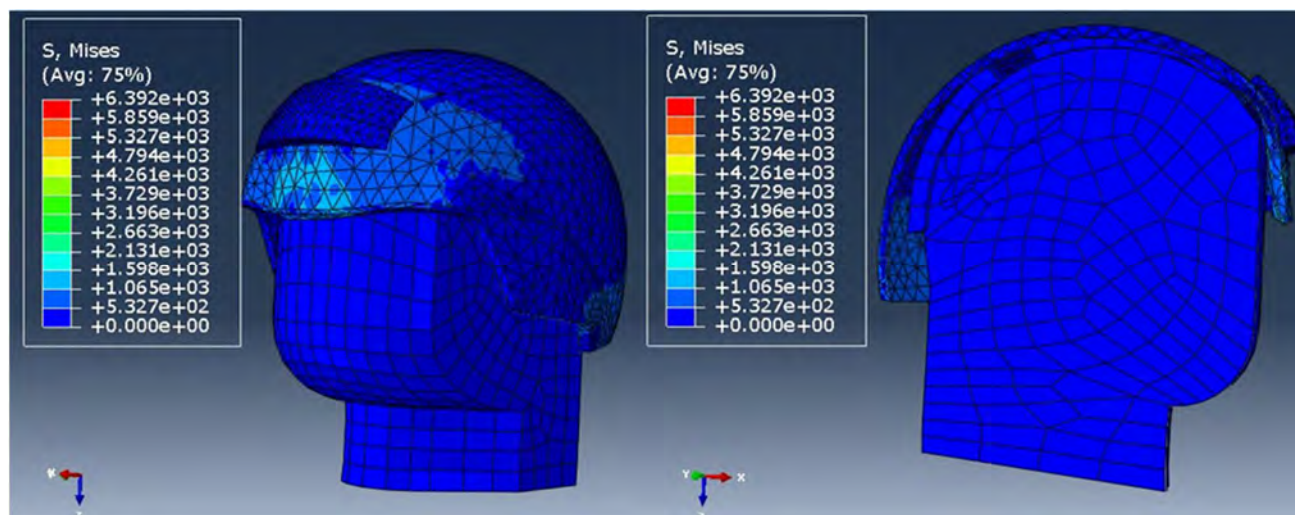
Además, dado el material que se utilizó, esta modificación no debería afectar prácticamente a las características iniciales del casco en peso o movilidad. La única adaptación necesaria sería añadirle algún tipo de adhesivo que fije las espumas al casco para que no se desplacen una vez puesto en la cabeza.

Los ensayos serán los mismos que en el caso anterior, en las mismas posiciones y con la misma intensidad.

6.3.1. Frontal con casco y espumas

Este ensayo tiene las mismas distancias que el ensayo anterior. Por eso vamos a utilizar las mismas características que usamos en los 2 casos anteriores. El foco se colocará a 200mm del centro de coordenadas y la carga de TNT será 1Kg.

Obtenemos los siguientes resultados:



51 - Tensiones del ensayo con espumas y explosión frontal

Después del ensayo, no se pueden apreciar muy bien los puntos de tensión máxima pero si vemos sucesos característicos:

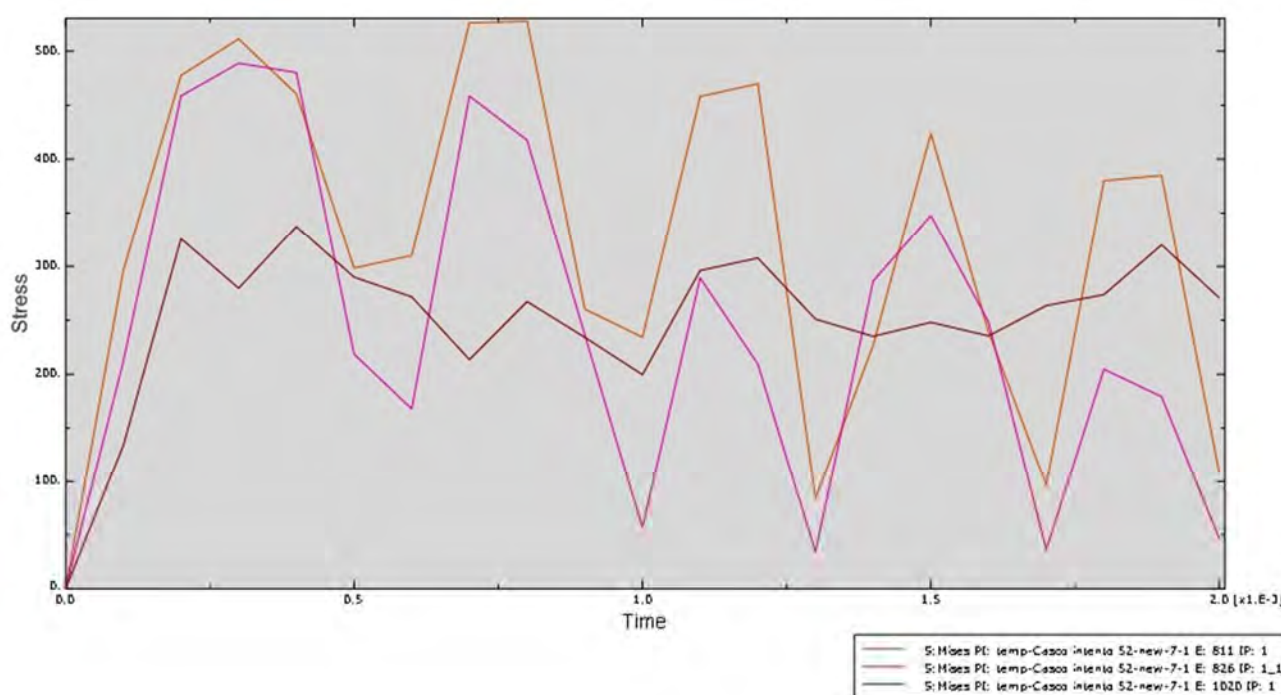
Vemos como la fuerza que se ejerció sobre el casco lo deformó. Lo hizo de tal manera que atravesó el forro frontal, lo que indica básicamente que el forro no logro amortiguar toda la tensión que el casco ejerció sobre él.

Aun así, esto fue suficiente para que se amortiguara gran parte de la fuerza que ejerce la explosión sobre la cabeza, evitando el impacto directo del casco sobre la superficie de la cabeza y disminuyendo la tensión en el punto de contacto.

A simple vista, y antes de analizar la gráfica, vemos que, por lo menos al final del ensayo, han desaparecido por completo las tensiones que se creaban en cuello y nuca en ensayos anteriores.

Como conclusión, podemos decir que, pese a romper el forro frontal, hemos logrado amortiguar gran parte de las tensiones que crea la explosión.

Veamos ahora con detalle que pasó durante el ensayo:



52 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo con espumas y explosión frontal

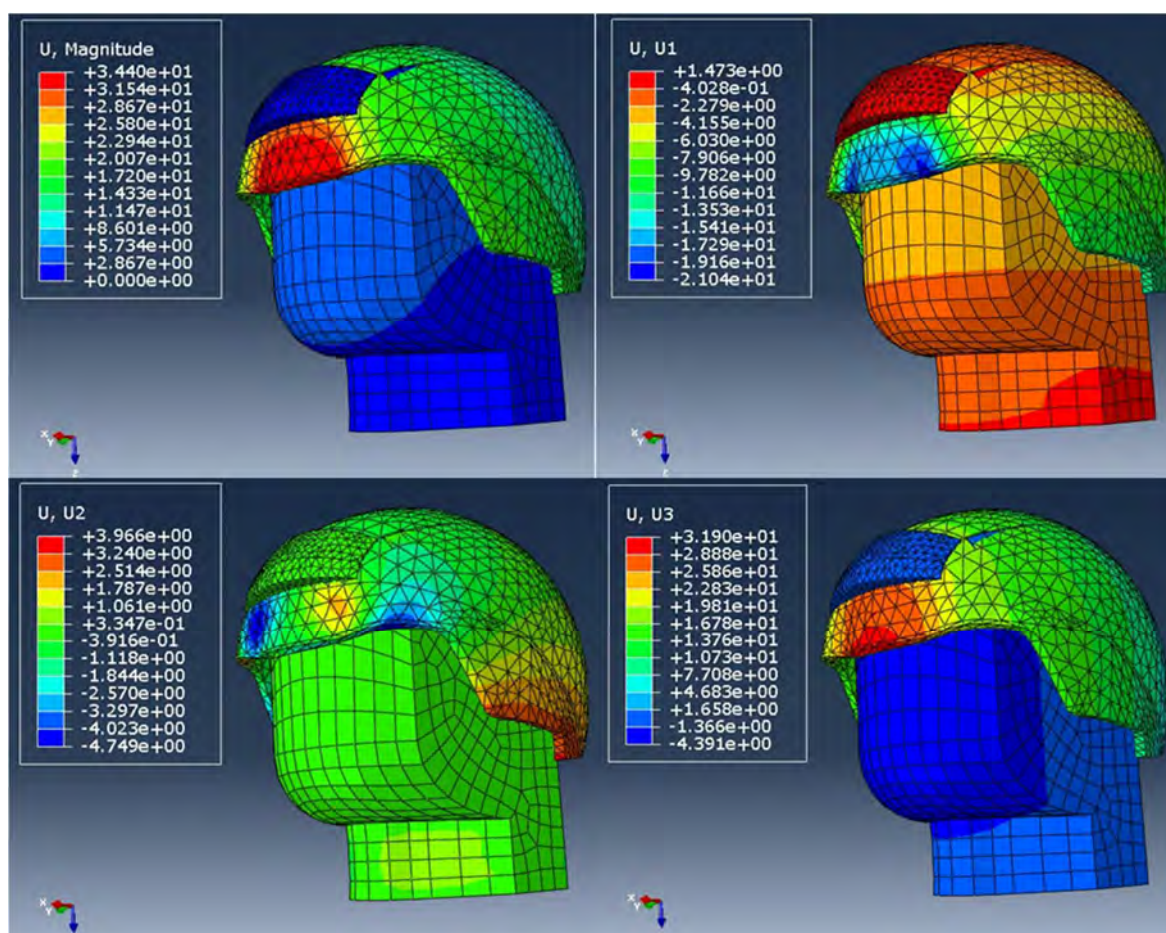
Se ha reducido el tiempo del ensayo para poder apreciar la parte más crítica del mismo, que es el impacto inicial.

Teniendo la línea marrón como un nodo de la cara, la línea naranja un nodo del cuello y la rosa de la nuca observamos lo siguiente:

Lo que hemos observado de primeras no es del todo cierto, la tensión ha llegado a la cabeza en una magnitud casi igual a la que teníamos en el ensayo inicial. Al final del ensayo estamos justo en el punto de mínimo de la vibración que genera la explosión en la cabeza, con lo que está justo en el punto en el que las tensiones se equilibran y la cabeza recupera su verticalidad. Aun así no todo son malos datos ya que, sabíamos desde el principio que la explosión frontal, hasta que no colocáramos una visera o algún tipo de protección facial, no íbamos a lograr amortiguarla.

Lo que sí se observa de mejoría en este caso es que la amortiguación que colocamos cumple su función, y hace que la vibración vaya disminuyendo más rápidamente que en casos anteriores, haciendo que las tensiones se vaya disipando más rápidamente después de cada pandeo.

A continuación estudiamos los desplazamientos y deformaciones que se han producido en el ensayo:



53 - Desplazamientos del ensayo con espumas y explosión frontal

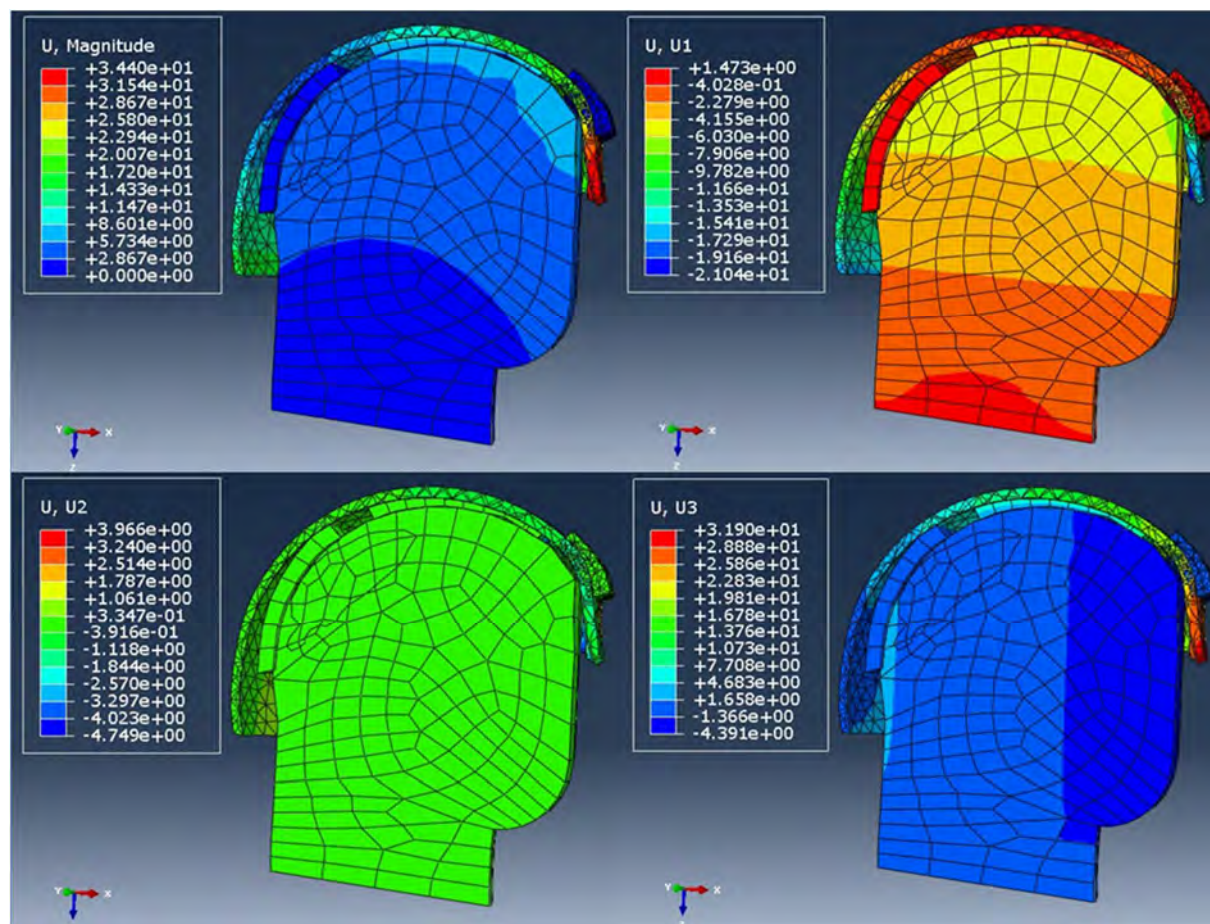
Como ya comentamos anteriormente, se ve como la deformación del casco es mayor que la del forro frontal, lo que indica que no pudo soportar la tensión y rompió.

Más datos característicos son que seguimos viendo el desplazamiento de la parte superior de la cabeza en dirección X negativa, la dirección de la onda expansiva, por lo que seguimos teniendo rotación del cuello, pudiendo provocar lesiones cervicales.

También observamos la deformación del eje Y y Z. En el eje Z vemos un desplazamiento en dirección Z positiva, o hacia abajo, que es consecuencia directa de la rotación de la cabeza según el eje Y que genera la explosión.

Por otro lado, en el eje Y vemos que la cabeza no sufre apenas desplazamientos, pero el casco si, el casco se deforma por los lados hacia el interior, pero, y aquí empiezan los datos positivos, no lo suficiente como para tocar la cabeza, con lo que sería una deformación aceptable a priori gracias al forro lateral.

Por último y gracias al corte realizado para ver que ha sucedido dentro del casco observamos lo siguiente:



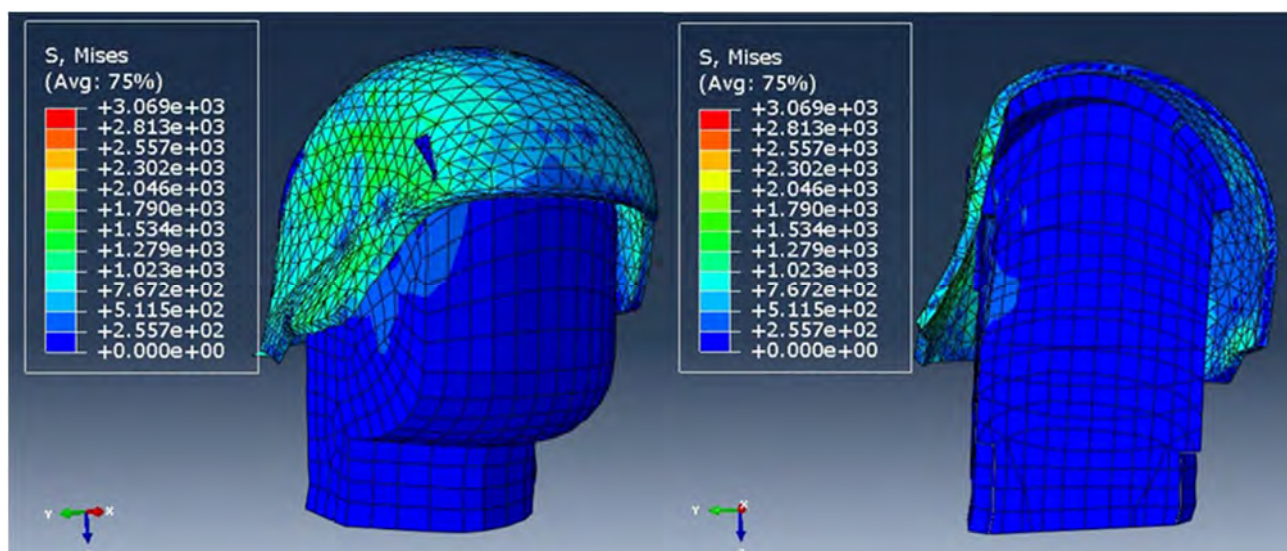
54 - Desplazamientos internos en el ensayo con espumas y explosión frontal

La parte frontal, que en el ensayo anterior se deformó y penetró dentro de la cabeza, esta vez, gracias a la amortiguación del forro delantero, aguantó y no se deformó tanto como para dañar la cara. Pese a esto, la parte frontal del casco sí que logro tocar la superficie de la cabeza, con lo que tendríamos que tomar la decisión de: o aumentar el grosor del forro, o hacerlo de un material algo más resistente para poder aguantar esa tensión.

Más partes de la cabeza se deforman debido a la tensión que ejerce el casco sobre ellas, pero todas en bastante menor medida que en los ensayos anteriores, con lo que comprobamos de nuevo que las espumas han funcionado, y han logrado amortiguar en parte la fuerza de la explosión disminuyendo el daño a la cabeza.

6.3.2. Lateral con casco y espumas

Este ensayo se ha realizado con las mismas características que el ensayo lateral anterior ya que no aumenta la distancia con el foco al añadir las espumas, se queda igual.



55 - Tensiones del ensayo con espumas y explosión lateral

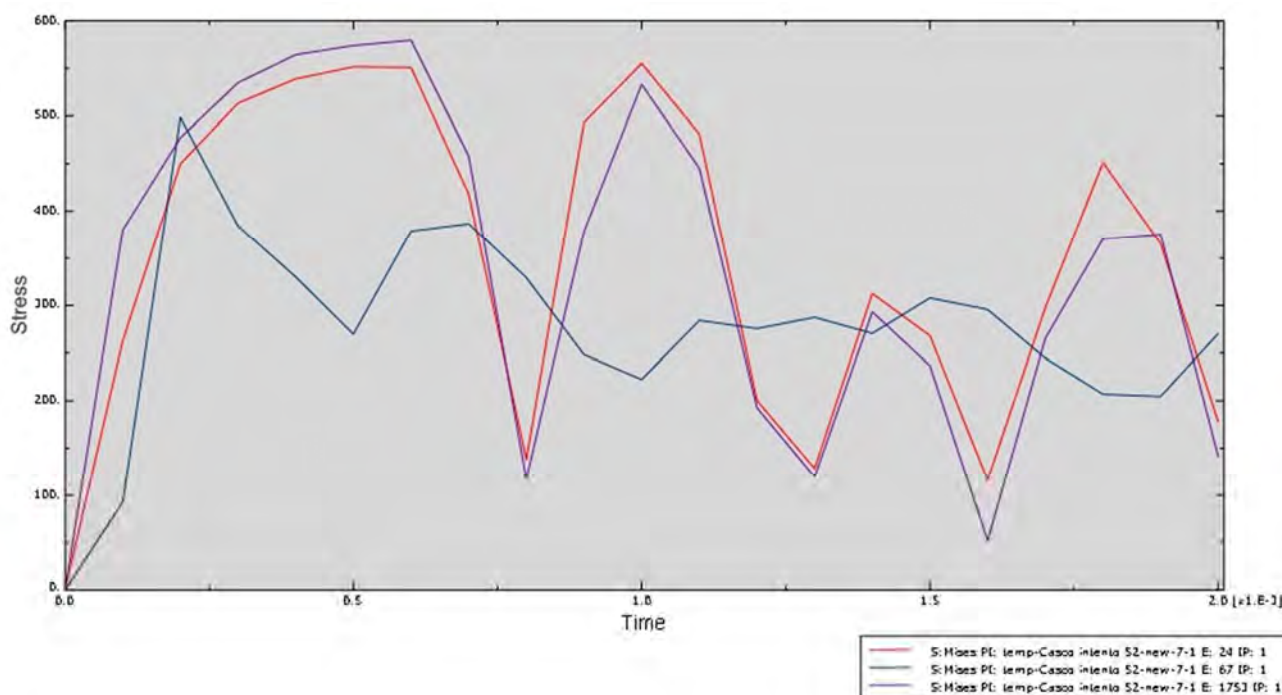
A primera vista ya se puede apreciar cómo han mejorado bastante los resultados. En el ensayo anterior, el casco se deformó muchísimo, tanto como para llegar a penetrar en la cabeza, produciendo gran cantidad de daño.

En este caso, la espuma ha logrado amortiguar la deformación del casco, impidiendo que este se deforme hacia dentro de la cabeza.

No todo son datos buenos ya que seguimos teniendo tensión que se genera en el lateral de la cabeza al impactar el casco contra ella cuando se deforma. En un principio sí parece menos que en el caso anterior pero no eliminamos el daño a la cabeza totalmente.

En lo referente a la deformación que sufre la estructura, sigue siendo bastante alta. En este caso incluso se puede apreciar como la cabeza se inclinó hacia su izquierda debido a la onda de choque de la explosión.

Por último, algo que se aprecia es que la espuma, situada en una parte bastante superior de la cabeza, no ha sido suficiente para contener la deformación del casco. Esto se podría solucionar haciendo una espuma un poco más grande, que llegue hasta debajo de la estructura del casco para evitar que este se deforme y contacte directamente con la cabeza.



56 - Gráfica de tensión/tiempo del ensayo con espumas y explosión lateral

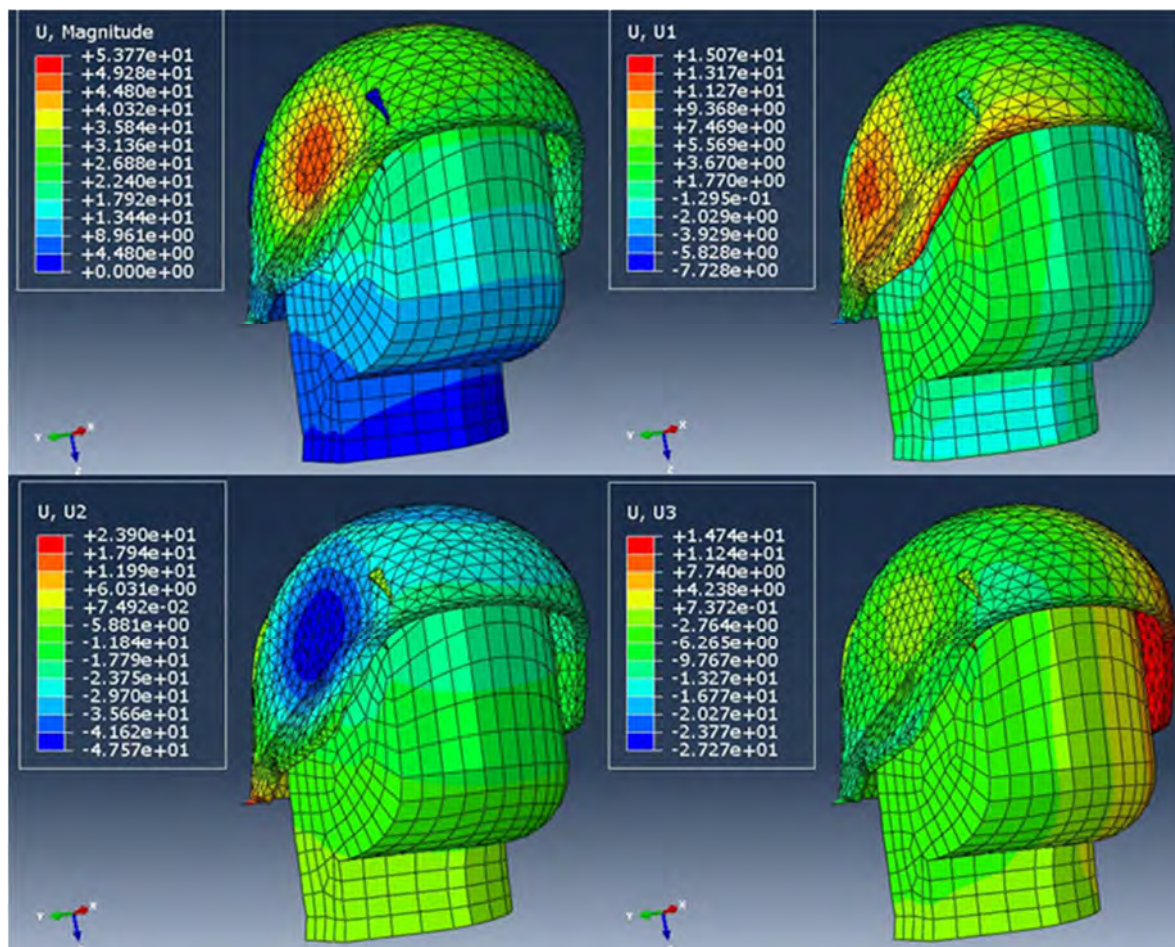
Gracias a la gráfica vemos como se han mantenido todas las tensiones críticas que teníamos en el caso anterior, incluso algunas, como el caso del nodo de la superficie de la cara, ha aumentado. Esto no tiene por qué ser un dato malo ya que en el ensayo previo, la rotura del casco impedía ver las tensiones reales que llegarían a la cabeza una vez este impactara contra ella, que obviamente, serían mayores.

Por lo demás, la forma de la entrada de la tensión es muy similar, generando vibraciones en el cuello que harán oscilar la cabeza de lado a lado. Esto se ve gracias a los picos que crean las tensiones aumentando y disminuyendo en poco tiempo.

Una vez hemos observado las tensiones vemos lo sucedido con las deformaciones y desplazamientos.

Según veremos en la foto siguiente, el casco se sigue deformando bastante, pero mucho mejor que en el caso sin espumas.

Las espumas han logrado detener parte de la deformación del casco, impidiendo que este penetre en la cabeza. No logran detener su deformación completamente ya que, finalmente, el casco si impacta contra ella, pero no es lo mismo un impacto que atravesarla directamente. El nivel de daño es obviamente mayor si un cuerpo entra dentro de otro que si simplemente lo golpea y lo deforma.

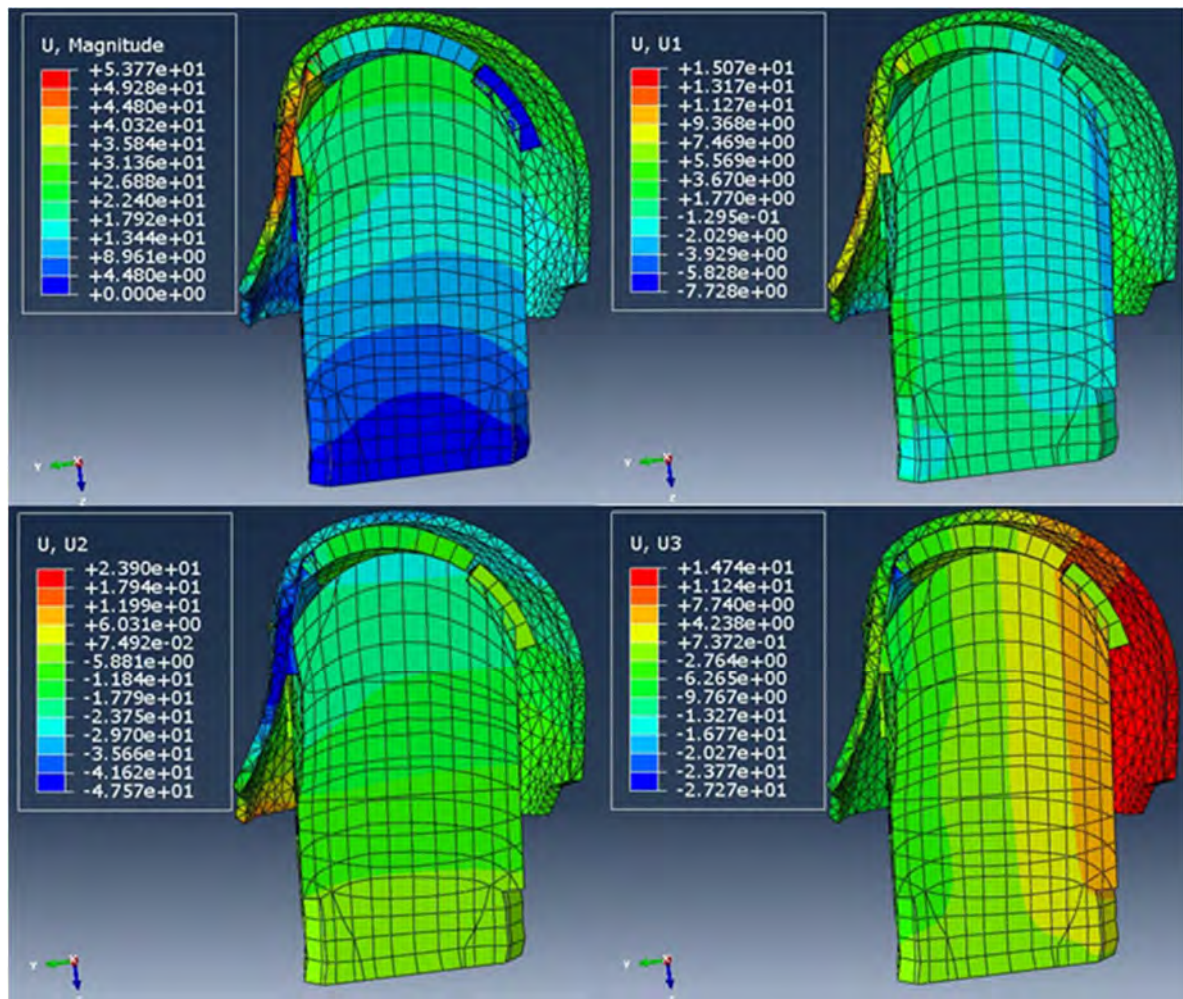


57 - Desplazamientos del ensayo con espumas y explosión lateral

El resto de deformaciones, además de la que se produce en el eje Y negativo, que es la que hace contactar el casco con la cabeza, tienen una magnitud parecida, ya que son consecuencia una de otras.

Al deformarse el casco en su eje Y, hace que parte del mismo se desplace hacia atrás y hacia abajo, ya que se debe hacer hueco al material desplazado.

Así es como aparecen el desplazamiento en el eje X positivo y en el eje Z, también positivo. El casco se desplaza hacia abajo y hacia atrás.



58 - Desplazamientos internos del ensayo con espumas y explosión lateral

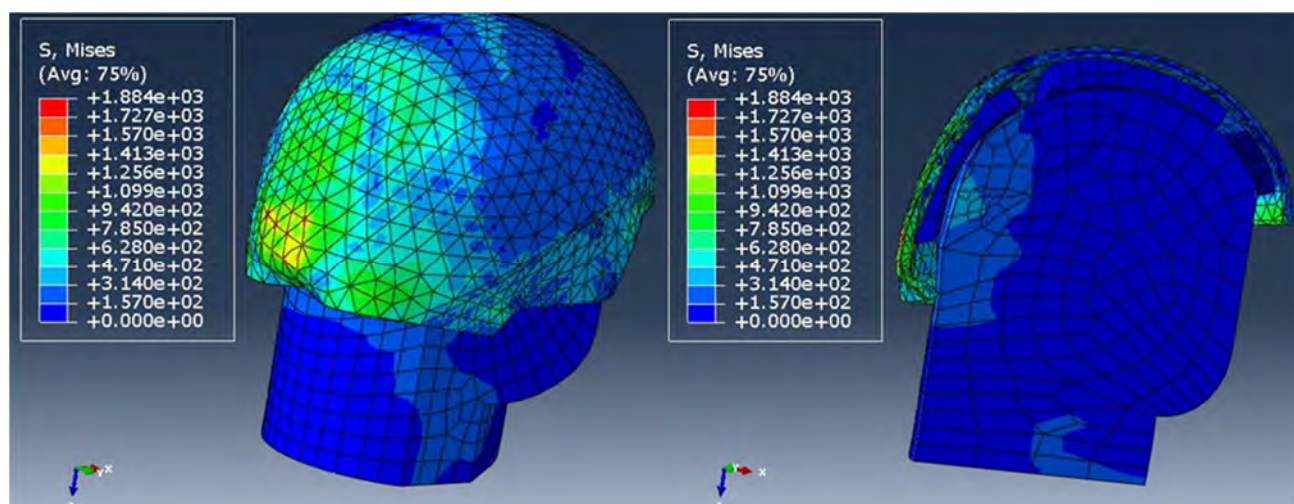
Gracias al corte vemos como se desplaza la cabeza. Seguimos teniendo un desplazamiento de más de 2mm en la parte alta de la cabeza en el eje Y. Este desplazamiento es el que está generando la rotación lateral de la cabeza según el eje X, que es el que genera las tensiones en el cuello y por el que podemos tener lesiones cervicales.

El resto de desplazamientos, al igual que pasa con los del casco, son consecuencia de este primero. Por eso, la cabeza se desplaza también hacia adelante y hacia abajo. Esta continuando el movimiento de rotación de la cabeza.

6.3.3. Trasera con casco y espumas

Para este ensayo no ha aumentado la distancia de la cabeza al foco, con lo que podemos ponerlo en el mismo punto, a 225mm del centro de coordenadas. Aplicamos además 1Kg de TNT como en anteriores ocasiones.

Obtenemos los siguientes resultados:



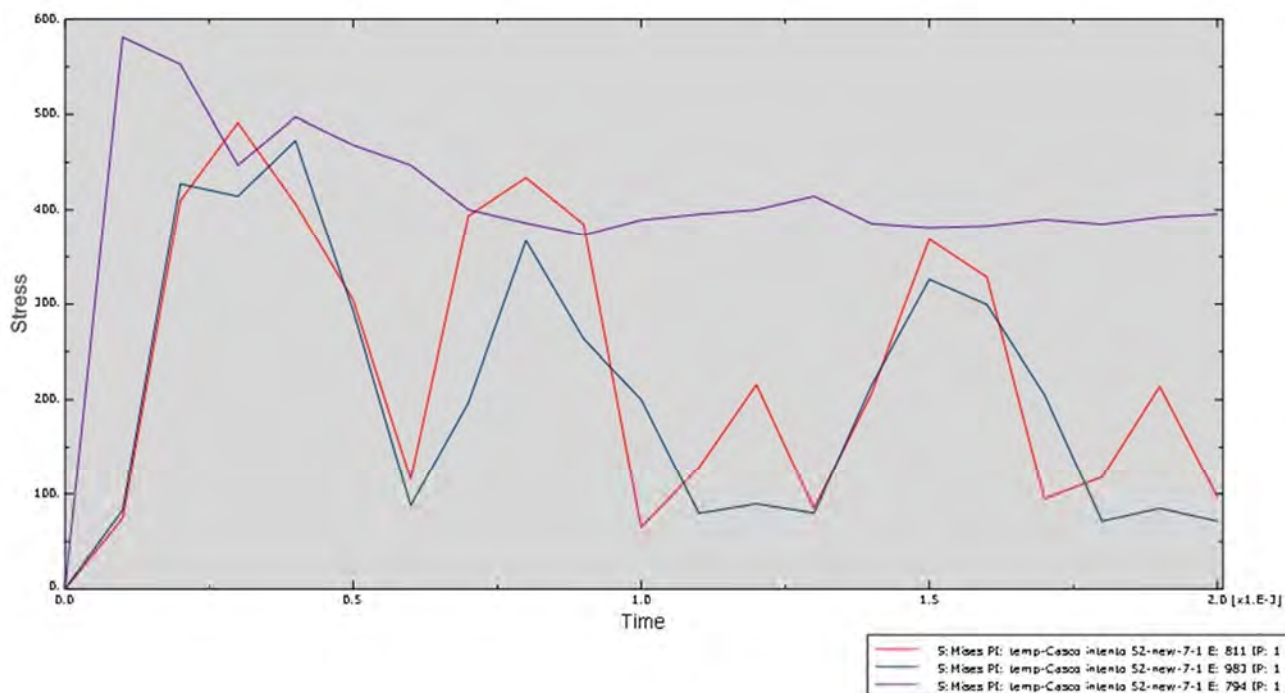
59 - Tensiones del ensayo con espumas y explosión trasera

Un primer vistazo al final del ensayo muestra resultados buenos. Hemos logrado disminuir bastante la tensión que se crea en el cuello y la tensión de la superficie de contacto entre el casco y la cabeza. El forro de espuma hizo su trabajo y amortiguó parte de la fuerza que viene de la explosión haciendo que se reparta por la superficie del casco y de las propias espumas, haciendo que llegue menos tensión a la cabeza.

A continuación detallaremos los que sucede en la cabeza, pero en esta primera imagen se pueden ver más detalles. Por ejemplo, el casco recibe, como en anteriores casos, la mayor tensión en la zona más cercana al foco, pero en este caso es menor ya que la amortiguación de la espuma hace que no deforme tanto y no impacte con la cabeza, eliminando gran parte del rozamiento.

Las espumas por el contrario casi no almacenan tensión, es un componente mucho más elástico que el acero o el aluminio lo que hace que amortigüen la tensión pero no la guarden en su estructura.

Veamos que paso en los nodos de la cabeza:



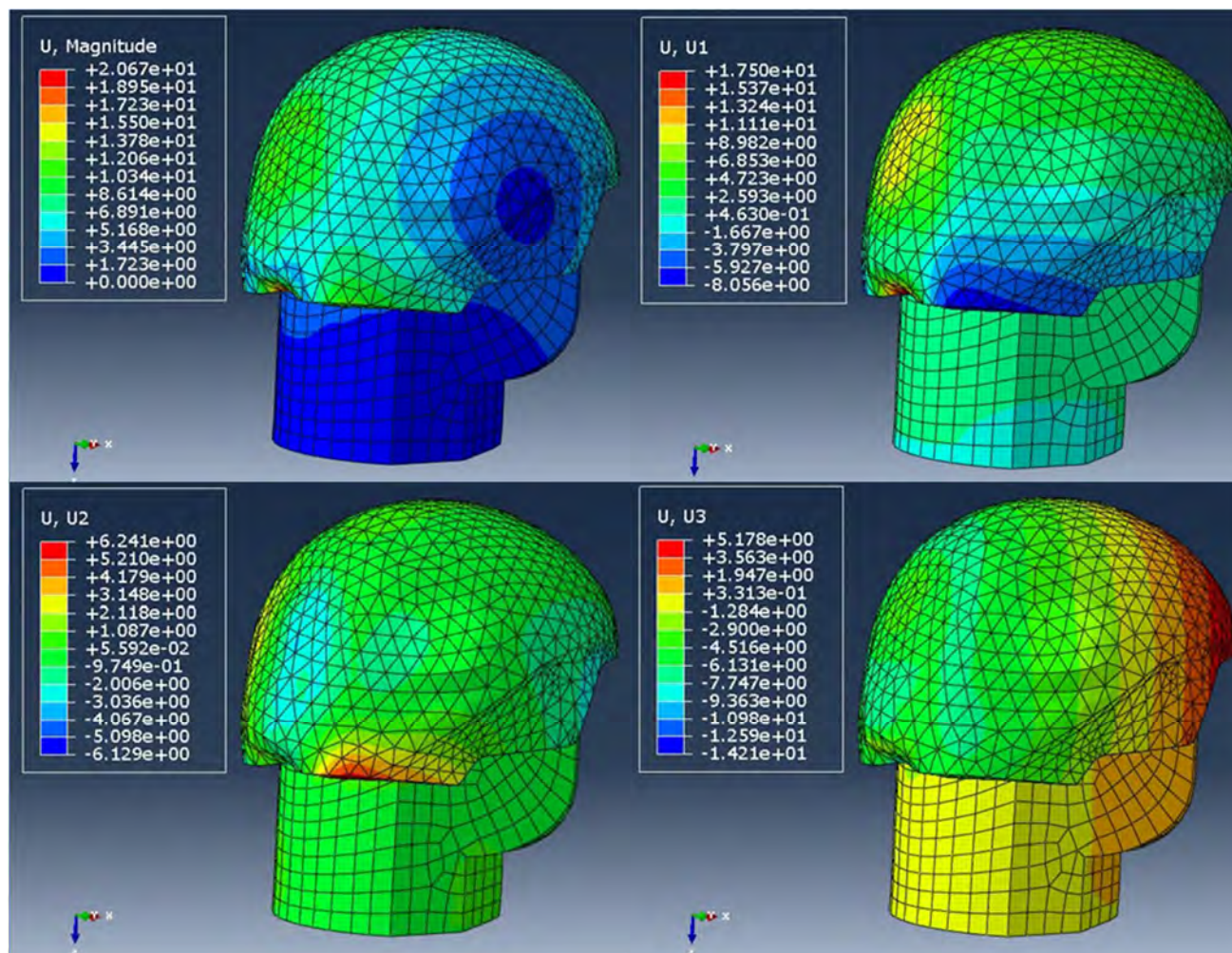
60 - Gráfica de tensión/tiempo del ensayo con espumas y explosión trasera

En esta grafica se representa el nodo de la cabeza en color morado, el nodo de la nuca en color azul y el nodo del cuello en color rojo.

En ella se puede observar cómo, en un momento inicial, al nodo de la superficie de la cabeza le llega una gran tensión que se va disipando muy lentamente, según se separa el casco de la misma.

Los nodos del cuello también reciben una gran tensión al inicio que genera una vibración, pero no es como el caso sin espumas. Esta se va disipando gradualmente y en el momento del final de la simulación está cerca de disiparse completamente.

Esto quiere decir que en el fondo, nuestras espumas amortiguadoras están funcionando, pero no lo suficiente. Para obtener mejores resultados de amortiguación deberíamos aumentar su grosor, o utilizar un material que amortigüe más el impacto.

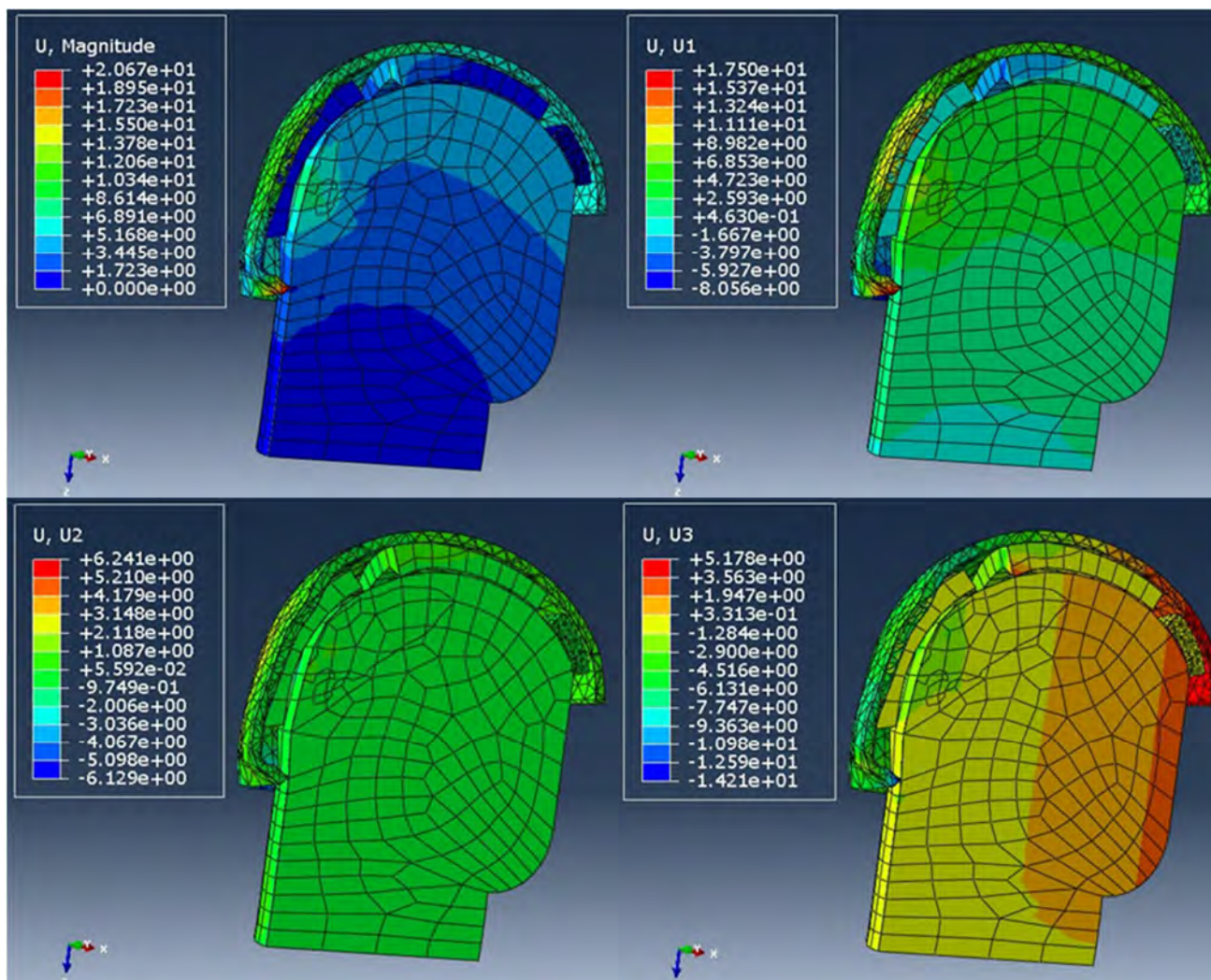


61 - Desplazamientos del ensayo con espumas y explosión trasera

En cuanto a los desplazamientos, son bastante buenos los resultados.

Anteriormente, en el caso sin espumas, la parte trasera del casco había penetrado en la cabeza. En este caso esto no sucede, y esto se debe a que la espuma evitó que el casco se siguiera deformando en esa dirección, evitando que entrara en contacto con la cabeza.

El mayor punto de daño por deformación que teníamos anteriormente se ha evitado, pero aun así seguimos teniendo desplazamiento de la parte superior de la cabeza, lo que indica que el cuello sigue sufriendo una rotación, tanto en el eje Y como en el Z en menor medida.



62 -Desplazamientos internos del ensayo con espumas y explosión trasera

Gracias al corte transversal de la cabeza vemos lo ocurrido con las espumas.

Se han deformado, pero no en gran medida, en su gran mayoría han sufrido el desplazamiento que sufre la cabeza, se inclinan hacia delante, pero esto no es una deformación propia de las espumas, les viene dada del desplazamiento del propio conjunto.

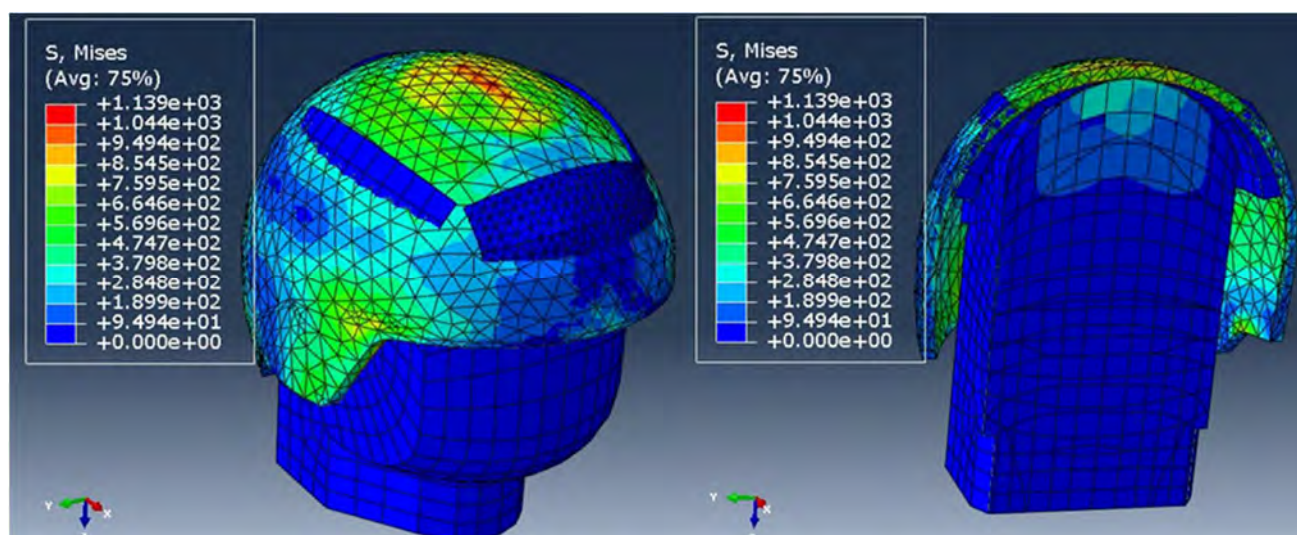
Como es normal, la que más deformación sufre es la espuma trasera, que es la que más amortiguación debe realizar para paliar los resultados de la explosión.

6.3.4. Superior con casco y espumas

Para este caso tuvimos que cambiar las condiciones del ensayo. Con las condiciones del ensayo anterior, la espuma superior se rompía, haciendo colapsar la estructura y no pudiendo obtener resultados.

Esto de por sí ya no es un buen resultado, ya que indica que la espuma superior no aguanta el ensayo, se rompe y pasamos a tener el casco contactando con la cabeza con en el caso anterior, con lo que no mejoraríamos. Para evitar esto lo que podríamos hacer es aumentar el grosor de dicha espuma, o incluso, poner a la espuma superior un material que amortigüe pero que a su vez sea más resistente que el material que estamos usando.

En todo caso, si separamos el foco hasta una distancia de 300mm y reducimos el ensayo en el tiempo, logramos ver los momentos previos a que el casco colapse debido a la rotura de la espuma.

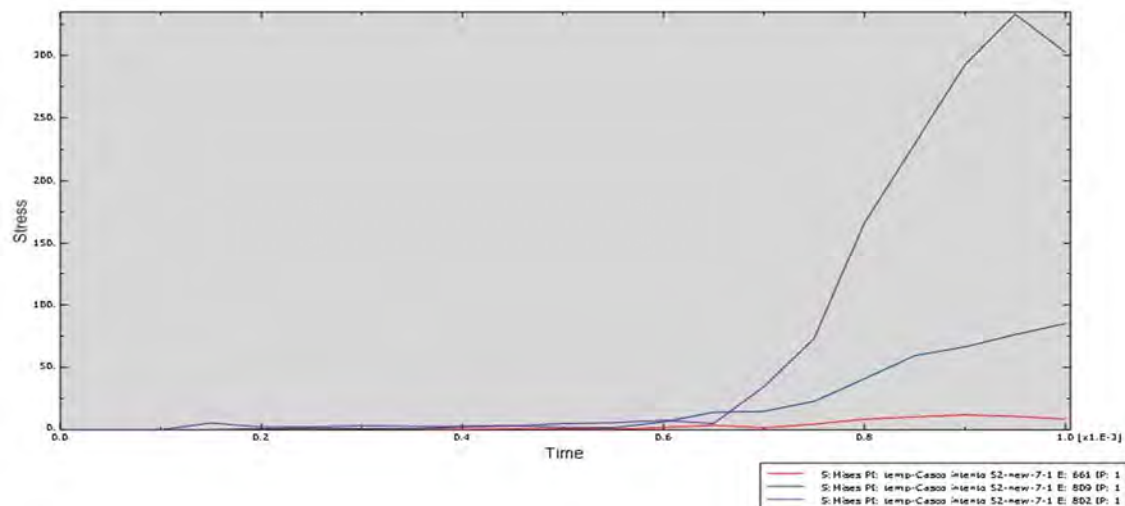


63 - Tensiones del ensayo con espumas y explosión superior

En la figura vemos perfectamente lo sucedido en el ensayo. La espuma superior se fue deformando hasta prácticamente desaparecer entre el casco y la cabeza. El casco se fue deformando más y más debido a las tensiones que ejerce la explosión sobre el sumado al efecto de la gravedad y la espuma no lo pudo aguantar y cedió.

Debido a esto, el casco impactó sobre la cabeza ejerciendo tensión sobre ella, lo que generaría grandes daños.

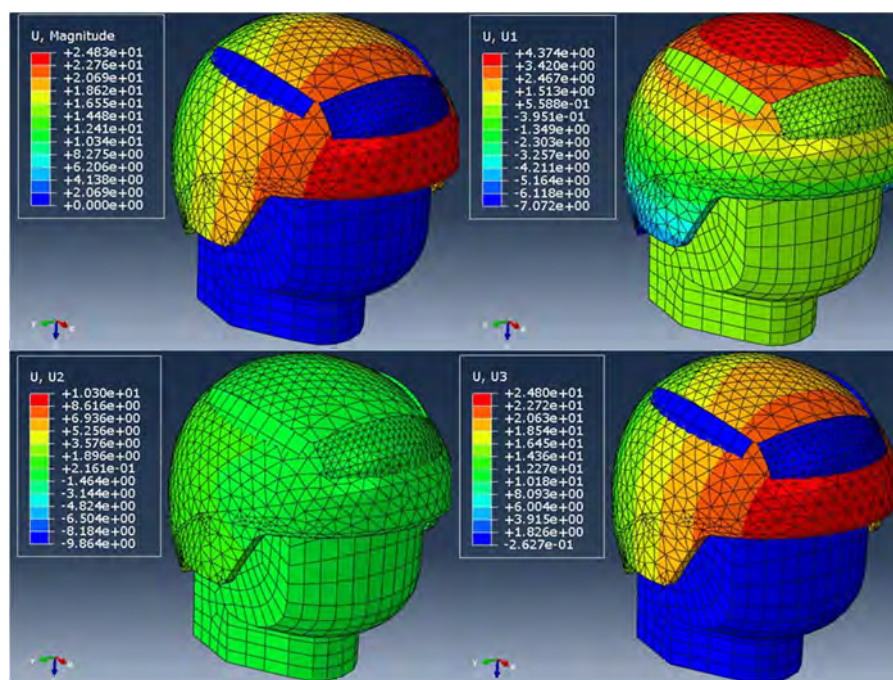
Por otro lado, si vemos que el cuello sufrió menos en este caso. Al actuar sobre la cabeza, no solo la espuma superior, sino el resto de espumas que soportan la tensión del casco, vemos como parte de las tensiones que iban al cuello se amortiguan.



64 - Gráfica de tensión/tiempo del ensayo con espumas y explosión superior

Gracias a la gráfica podemos ver perfectamente el momento en el que se rompe la espuma, transmitiendo toda la tensión a la parte superior de la cabeza, representada por la línea morada.

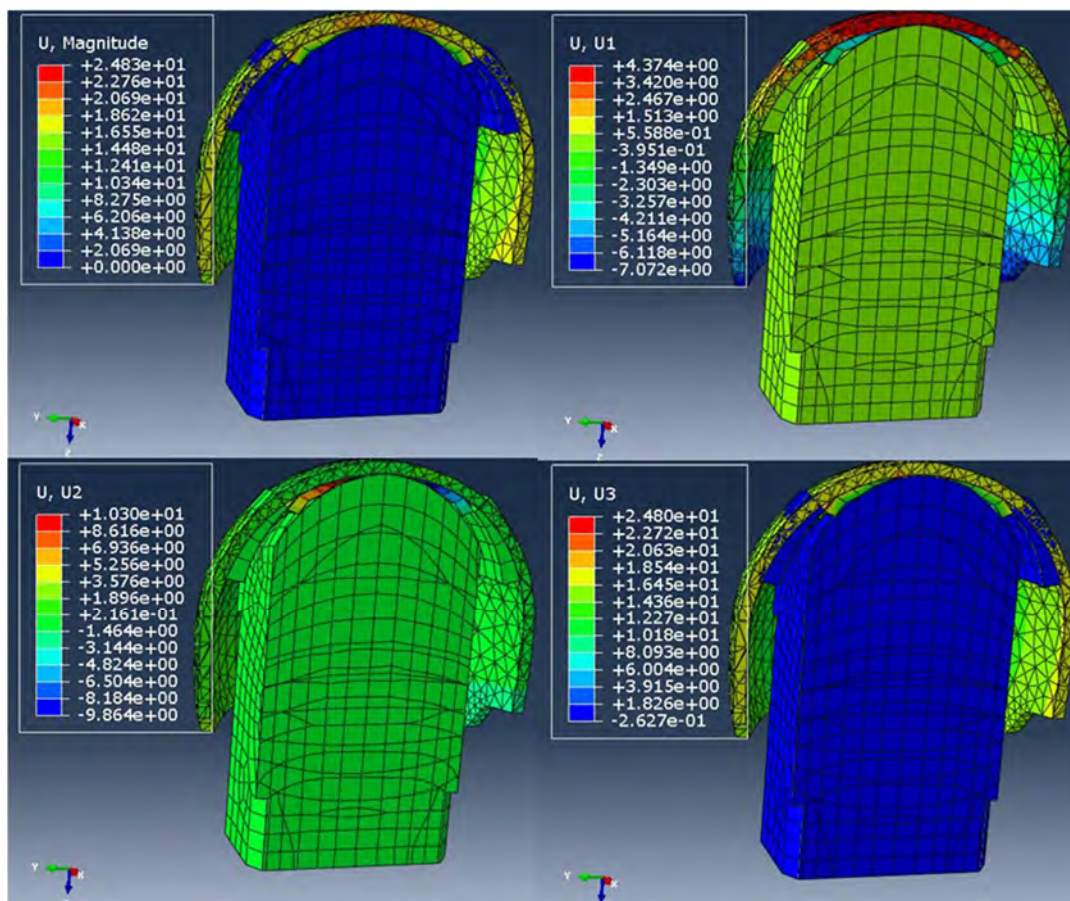
Las otras 2 líneas representan nodos en la nuca y el cuello. Como se observa, esas tensiones si lograron amortiguarse en parte, pero, como a partir de ese punto dejamos de tener la amortiguación de la espuma superior, la lógica nos dice que seguramente aumente la tensión a partir de ese punto, ya que a partir de aquí, volvemos a las características del caso 2, aunque seguramente sean menores ya que hemos alejado el foco de la explosión.



65 - Desplazamientos del ensayo con espumas y explosión superior

Las deformaciones que se producen son iguales que en el caso anterior ya que la espuma no logró aguantar la tensión y cedió. Lo que sí que logramos evitar, gracias al equilibrio que generan el resto de espumas amortiguando la explosión, es que se deforme el cuello, al menos hasta el punto que logramos comprobar, donde se rompe la espuma.

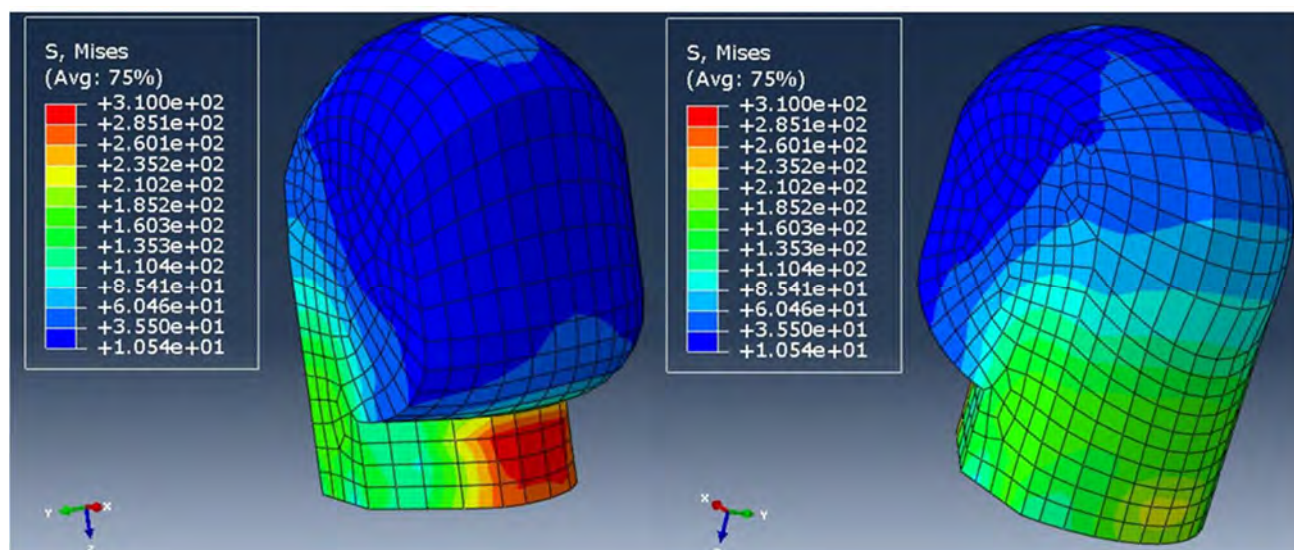
Como vemos se produce el contacto del casco con la cabeza y la propia deformación de la misma hacia el interior. Esta deformación puede producir grandes daños.



66 - Desplazamientos internos del ensayo con espumas y explosión superior

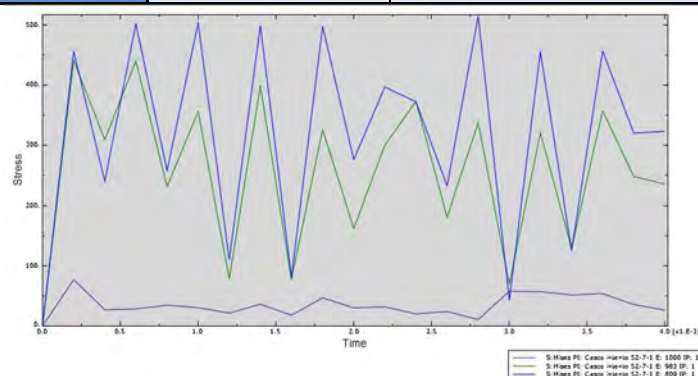
7. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

7.1. EXPLOSIÓN FRONTAL



67- Tensiones del ensayo de cabeza sin casco y explosión frontal

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.1.	520	0,00252	Cuello
	451	0,0005	Nuca
	87	0,00025	Cabeza

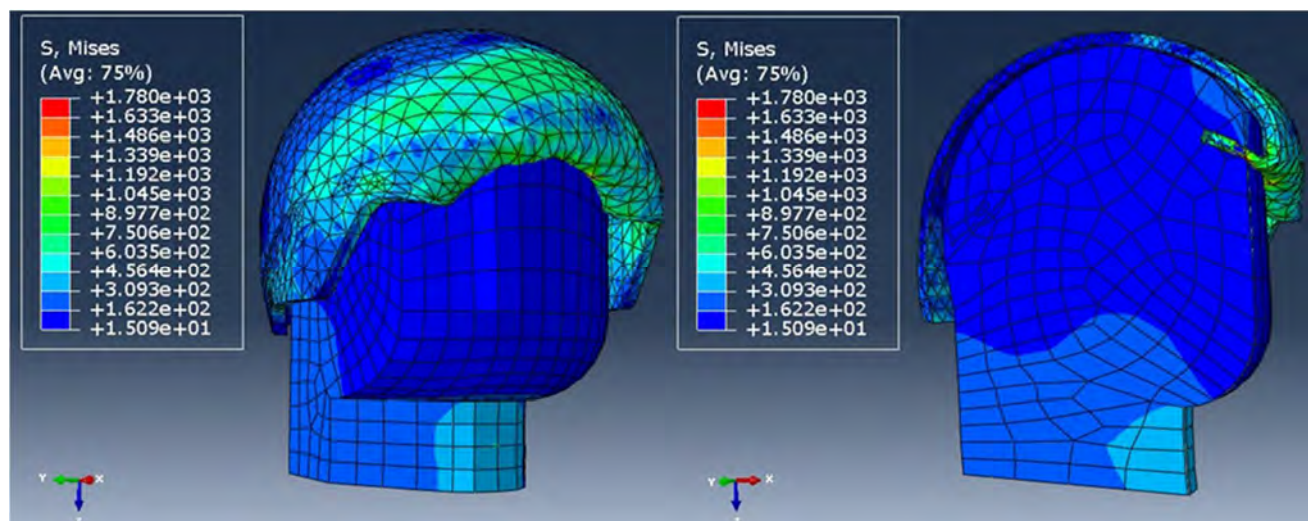


68 - Gráfica de tensión/tiempo del ensayo 6.1.1.

La mayoría de las tensiones en este caso se localizan en el cuello. También tenemos alta rotación de la cabeza en su eje Y sumado a, en menor medida, la del eje Z.

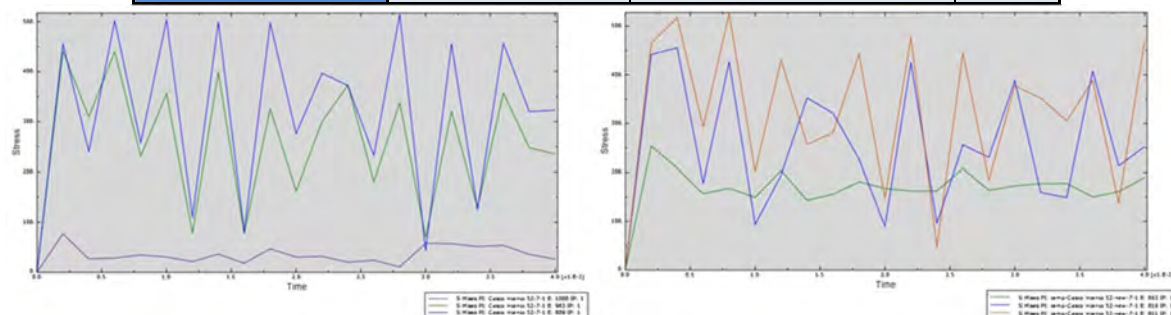
La gráfica muestra alta resonancia en la cabeza, lo que puede generar daños cervicales.

Al colocarle el casco:



69 - Tensiones del ensayo con casco y explosión frontal

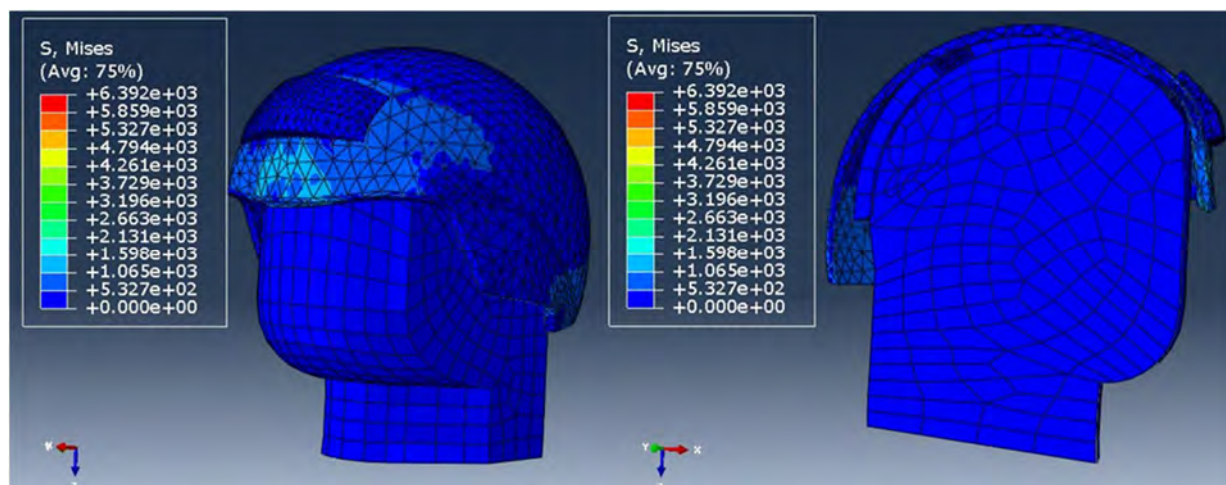
Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.1.	520	0,00252	Cuello
	451	0,0005	Nuca
	87	0,00025	Cabeza
Con casco 6.2.1.	450	0,0004	Cuello
	542	0,0007	Nuca
	256	0,000252	Cabeza



70 - De izquierda a derecha, Gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.1. y 6.2.1. respectivamente

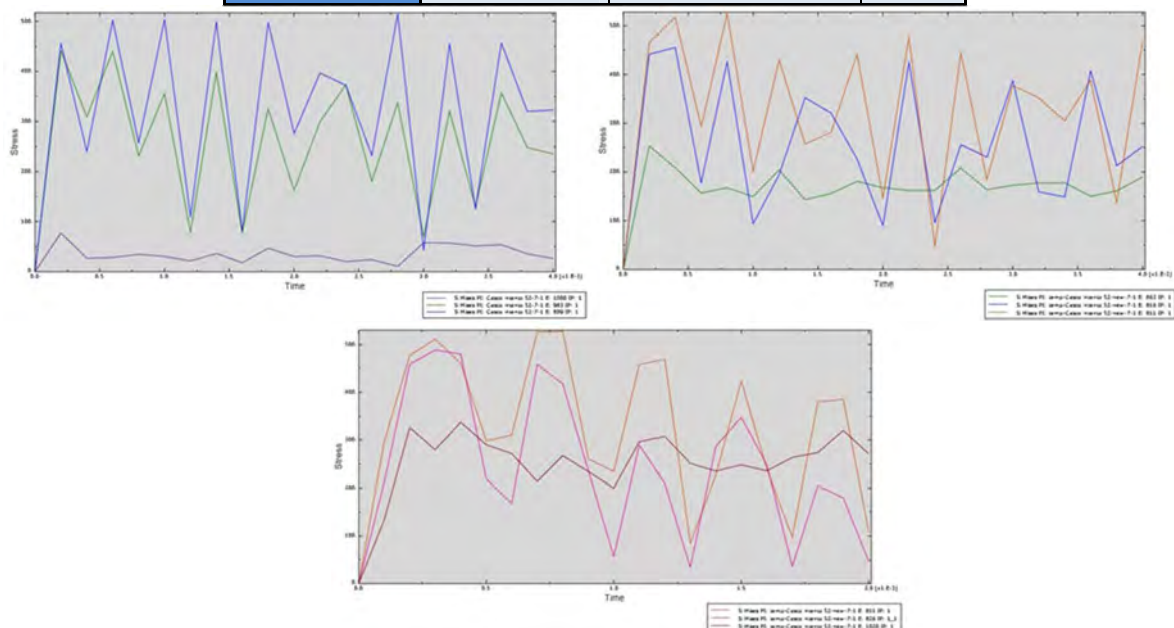
Se mantienen los puntos críticos de los 3 nodos pero logramos hacer más estable la estructura amortiguándola en parte, se alarga la frecuencia de vibración lo que significa precisamente eso. Aumenta la tensión de la cara debido a que el casco penetró en ella, si logramos reforzar esa parte para que no se deforme tanto, o si colocamos una visera que también haga de apoyo del casco, evitaríamos esa subida o la reduciríamos.

Cuando le colocamos las espumas:



71 - Tensiones del ensayo con espumas y explosión frontal

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.1.	520	0,00252	Cuello
	451	0,0005	Nuca
	87	0,00025	Cabeza
Con casco 6.2.1.	450	0,0004	Cuello
	542	0,0007	Nuca
	256	0,000252	Cabeza
Con espumas 6.3.1.	535	0,0006	Cuello
	480	0,00025	Nuca
	339	0,0004	Cabeza



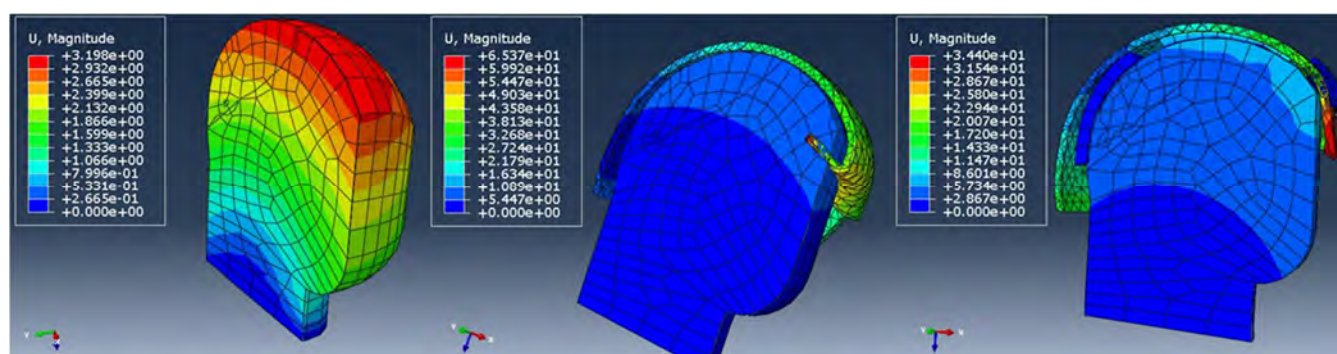
72 - de izquierda a derecha y arriba abajo, gráficas tensión/tiempo de los ensayos 6.1.1., 6.2.1 y 6.3.1.

Esta gráfica compara las tensiones que conseguimos gracias a las gráficas en todos los ensayos.

Las tensiones del cuello siguen con los mismos máximos. Para evitar este problema tendríamos que añadir algún tipo de apoyo cervical, unas placas de acero debidamente situadas y apoyadas en el casco y los hombros que sujeten el cuello cuando la cabeza rota sobre su eje Y, en este caso, hacia atrás.

Logramos armonizar aún más la frecuencia de vibración de la cabeza, con lo que la amortiguación surtió efecto.

Otra cosa que se observa de las gráficas es cómo, además de tender a ser menos bruscas, también van bajando a partir de alcanzar el punto crítico, lo que muestra de nuevo como el sistema funciona a la hora de amortiguar.



73 - de izquierda a derecha, desplazamientos de los ensayos 6.1.1., 6.2.1., 6.3.1.

Ensayo	Desplazamiento max. (mm)
Sin casco 6.1.1.	3,198
Con casco 6.2.1.	5,447
Con espumas 6.3.1.	5,734

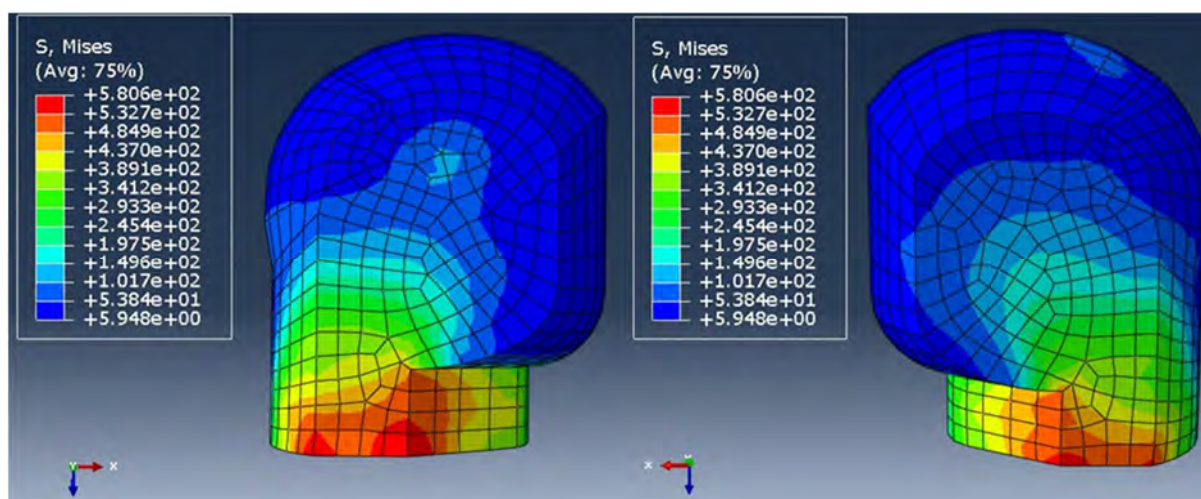
Finalmente, los desplazamientos muestran que la rotación del cuello hacia atrás se aumenta en 2mm, esto es debido al peso que le añade el casco a la cabeza. Al ser masa en suspensión este peso aumenta la inercia del punto superior de la cabeza, haciendo que se incline más hacia detrás.

Al igual que para eliminar las tensiones del cuello, que en gran parte no bajan debido a esta rotación, habría que diseñar un apoyo cervical que impida la rotación de la cabeza hacia atrás.

Como conclusión del ensayo frontal se puede deducir varios puntos:

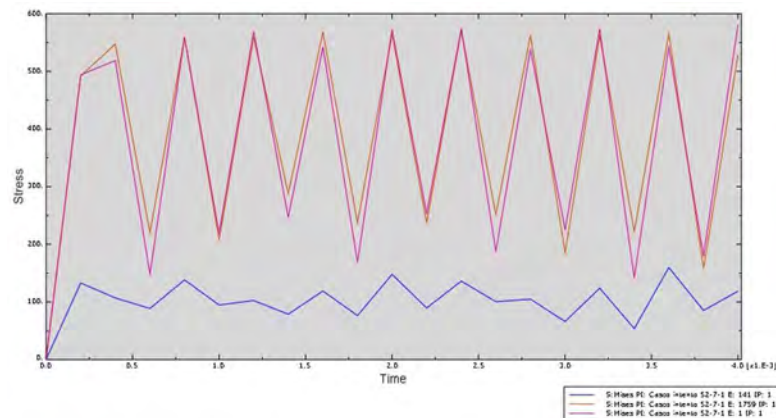
- No se puede disminuir la tensión que llega a la cara de 100MPa que se crea en el ensayo inicial hasta que no se añada una visera y un bucal, para frenar la onda de choque.
- Los sistemas añadidos para amortiguar el daño funcionan pero no son eficientes, tendríamos que perfeccionarlos dándole más resistencia al casco y aumentando el grosor de las espumas, entre otras acciones posibles.
- Añadir un apoyo cervical evitaría el daño en el cuello y los desplazamientos de la parte alta de la cabeza.

7.2. EXPLOSIÓN LATERAL



74 - Tensiones del ensayo 6.1.2.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.2.	580,6	0,004	Izquierda
	572	0,0024	Derecha
	169	0,0036	Cabeza

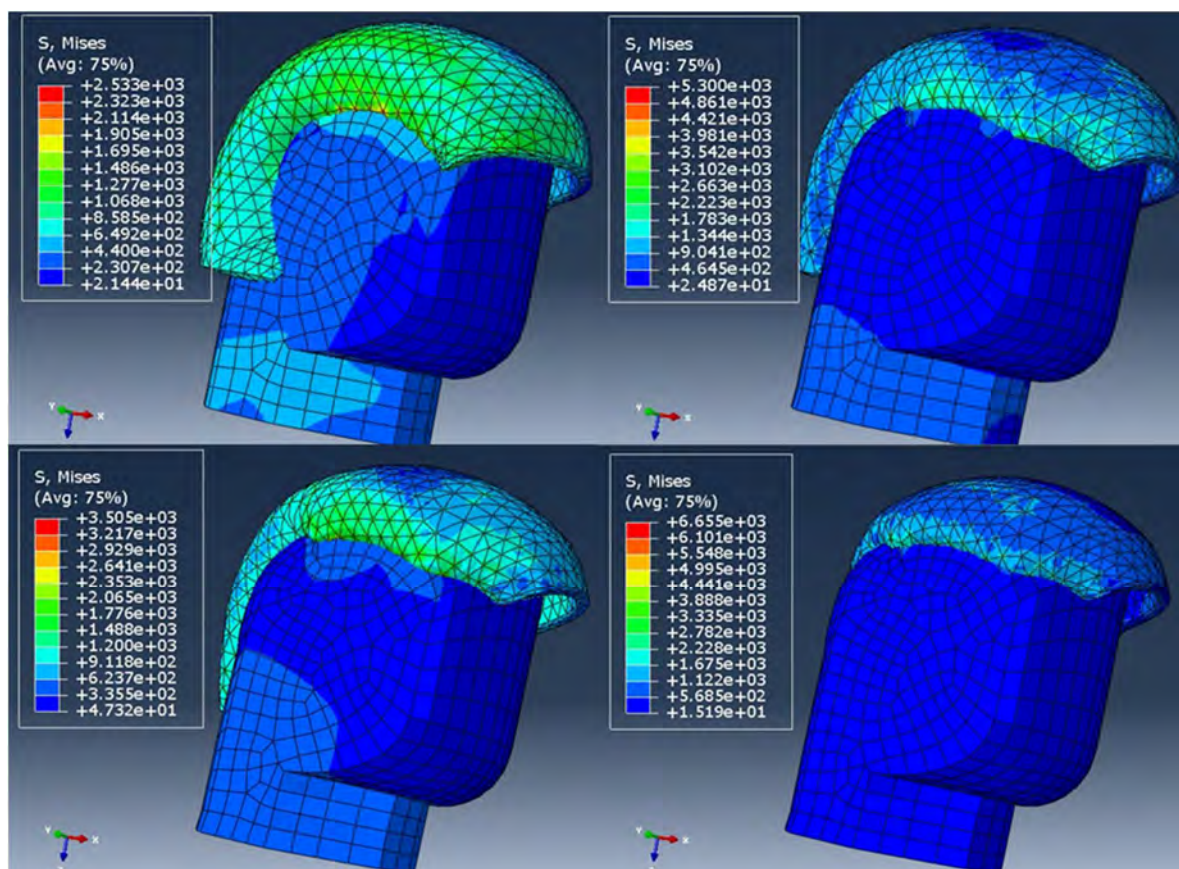


75 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo 6.1.2.

Sin ningún tipo de protección observamos grandes tensiones en el cuello y el lateral de la cabeza.

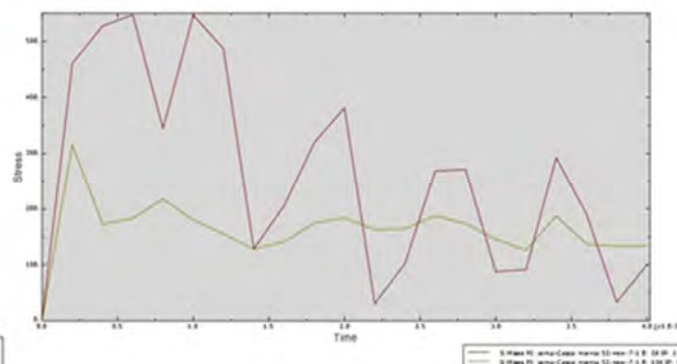
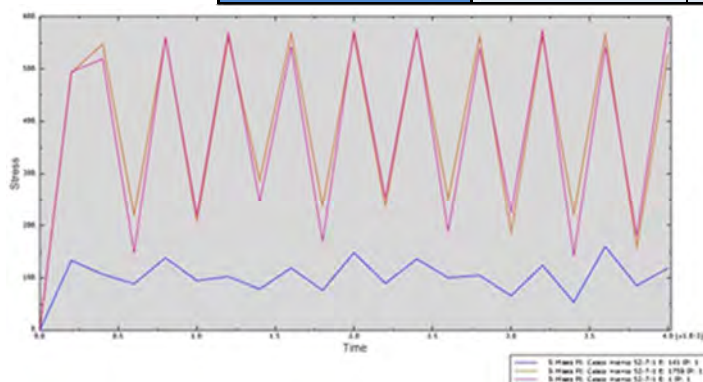
La resonancia que se produce es incluso mayor que en el ensayo frontal ya que tenemos más superficie lateral de cabeza que frontal. En dirección Y, la sección del cuello ofrece menor resistencia al ser más estrecha que profunda.

Le colocamos el casco:



76 - Tensiones del ensayo 6.2.2.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.2.	580,6	0,004	Izquierda
	572	0,0024	Derecha
	169	0,0036	Cabeza
Con casco 6.2.2.	550	0,001	Izquierda
	550	0,001	Derecha
	327	0,00025	Cabeza

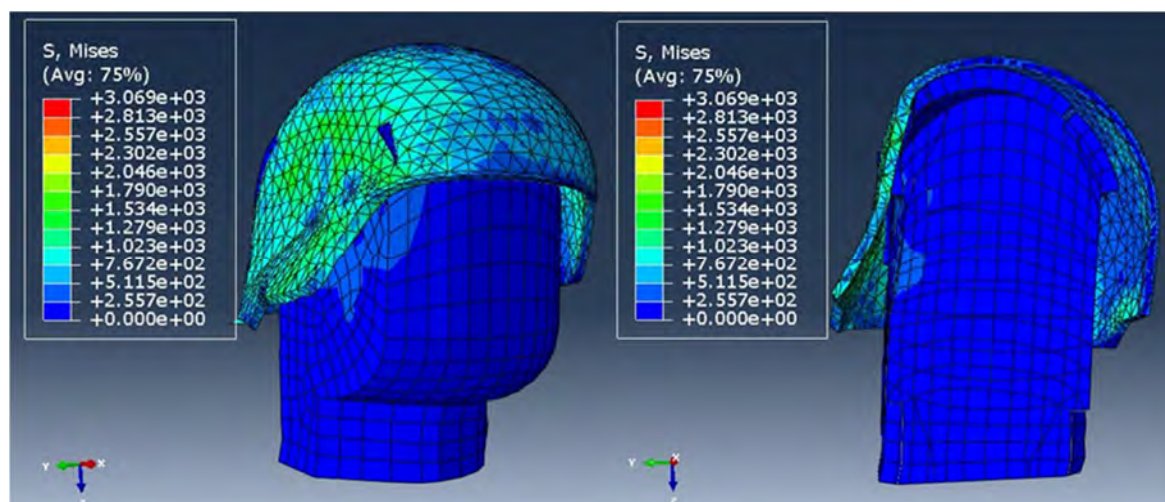


77 - De izquierda a derecha, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.2. y 6.2.2.

Una vez colocado el casco vemos como bajan las tensiones de cuello y lateral de la cabeza, pero se mantiene la rotación del cuello y añadimos el problema de la deformación del casco, que penetra en la cabeza causándole graves daños y grandes tensiones.

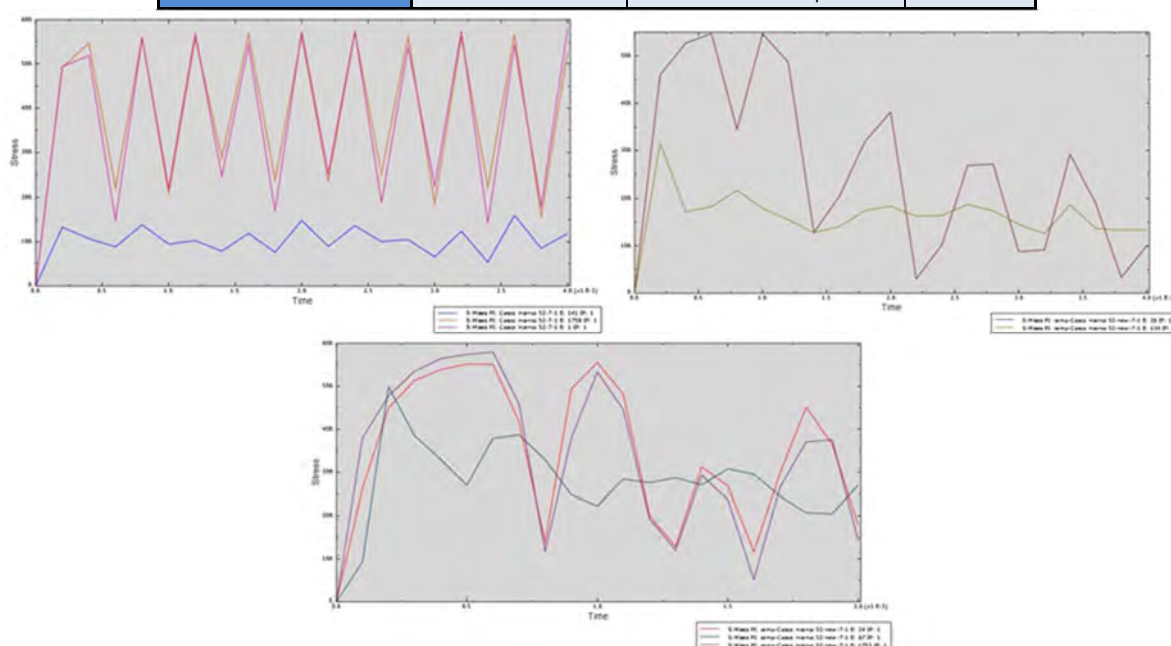
La vibración del cuello se ha armonizado en parte pero en el instante inicial, cuando toma contacto el lateral con la cabeza, se genera un gran desequilibrio que genera gran tensión en el cuello.

Añadimos las espumas:



78 - Tensiones del ensayo 6.3.2.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.2.	580	0,004	Izquierda
	572	0,0024	Derecha
	169	0,0036	Cabeza
Con casco 6.2.2.	550	0,001	Izquierda
	550	0,001	Derecha
	327	0,00025	Cabeza
Con espumas 6.3.2.	575	0,00065	Izquierda
	555	0,001	Derecha
	500	0,00023	Cabeza

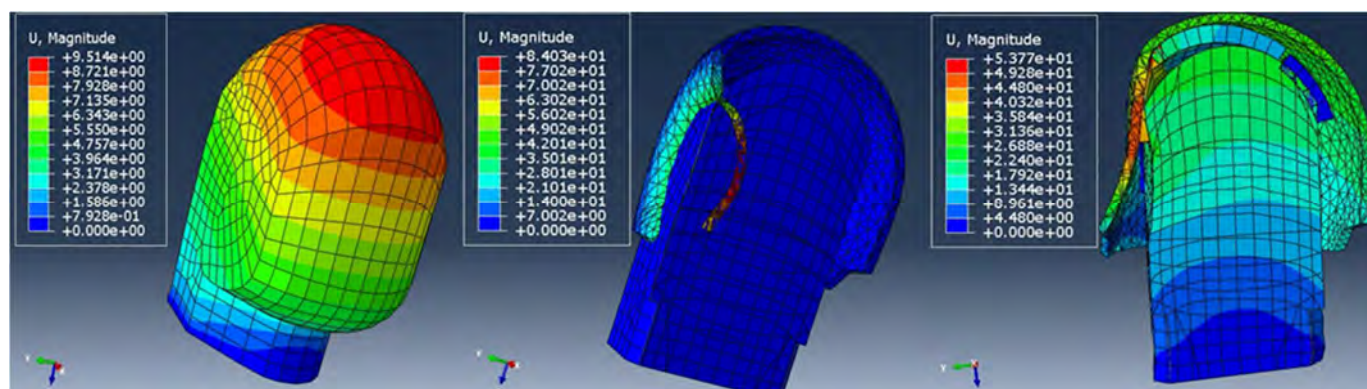


79 - De izquierda a derecha y de arriba abajo, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.2., 6.2.2. y 6.2.3.

Se observa una mejora muy importante respecto al ensayo anterior, el casco se deformó, pero no lo suficiente como para penetrar en la cabeza.

A parte de esta observación, las tensiones también bajaron aunque siguen siendo altas ya que la espuma no protege la totalidad de la cara y hay puntos en los que el casco sigue impactando sobre ella haciendo subir la tensión máxima.

La espuma lateral no aguantó la explosión y no evito que el casco impactase contra la cabeza, de ahí el aumento de tensión de la cara y que se mantengan las tensiones del cuello con respecto al ensayo anterior.



80 - De izquierda a derecha, desplazamientos de los ensayos 6.1.2., 6.2.2 y 6.3.2.

Ensayo	Desplazamiento max. (mm)
Sin casco 6.1.2.	9,51
Con casco 6.2.2.	7,002
Con espumas 6.3.2.	17,9

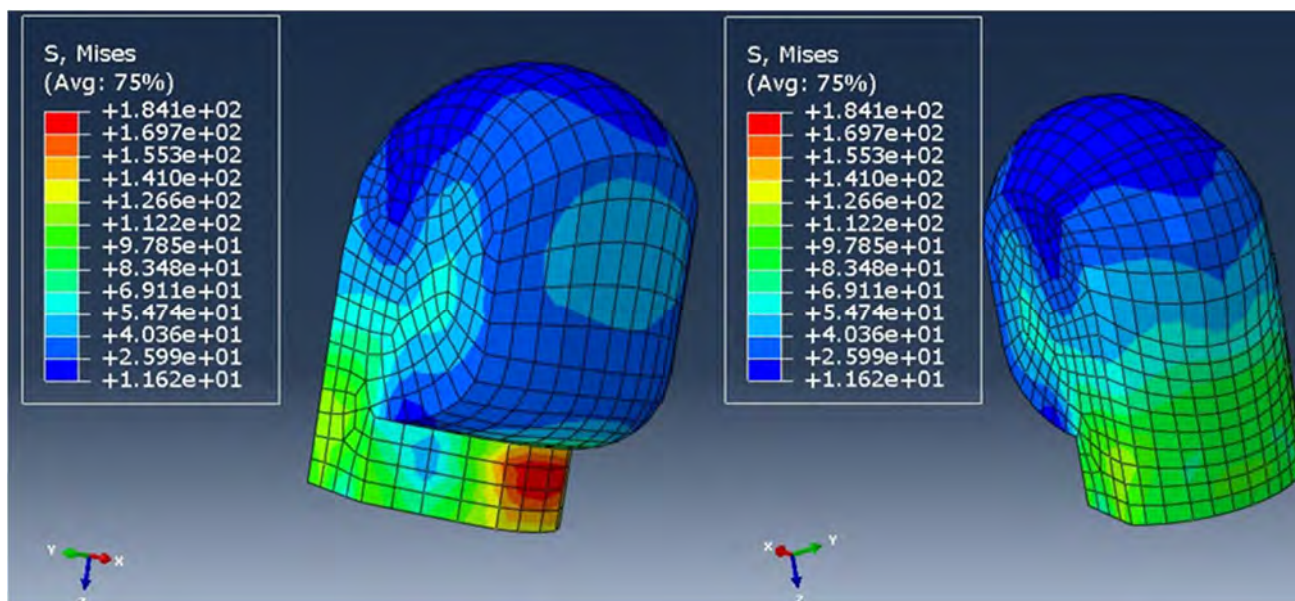
Los desplazamientos muestran datos similares a los que obtuvimos con el ensayo frontal. Tenemos más desplazamientos superiores a cada ensayo debido a tener mayor masa en suspensión que aumenta la inercia del sistema. A esto le tenemos que añadir el efecto que genera la penetración del casco en el caso 2, que en el ensayo no puede apreciarse, pero produciría un desplazamiento de masa para hacerse espacio al entrar.

Un apoyo resistente que no se rompa con la explosión haría que el casco se mantuviera apoyado en los hombros y no fuera una masa en suspensión con lo que generaría menos inercia y rotaría menos el cuello.

Concluimos con las siguientes mejoras:

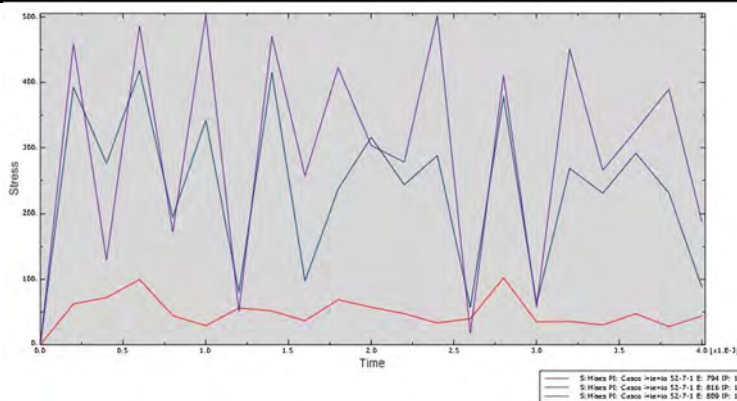
- Aumentar la superficie de la espuma lateral para cubrir la mayor parte del lateral de la cabeza.
- Colocar apoyos laterales para el cuello y evitar así la rotación de la cabeza, tanto en eje X como en Z.

7.3. EXPLOSIÓN TRASERA



81 - Tensiones del ensayo 6.1.3.

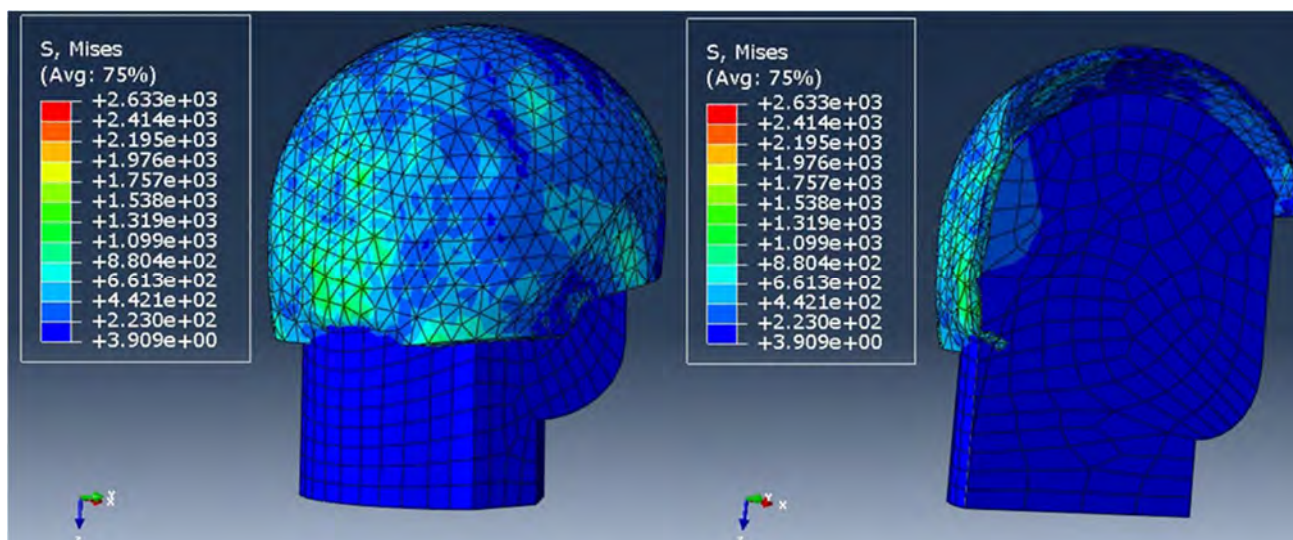
Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.3.	110	0,0006	Cabeza
	427	0,0006	cuello
	505	0,001	nuca



82 - Gráfica tensión/tiempo del ensayo 6.1.3.

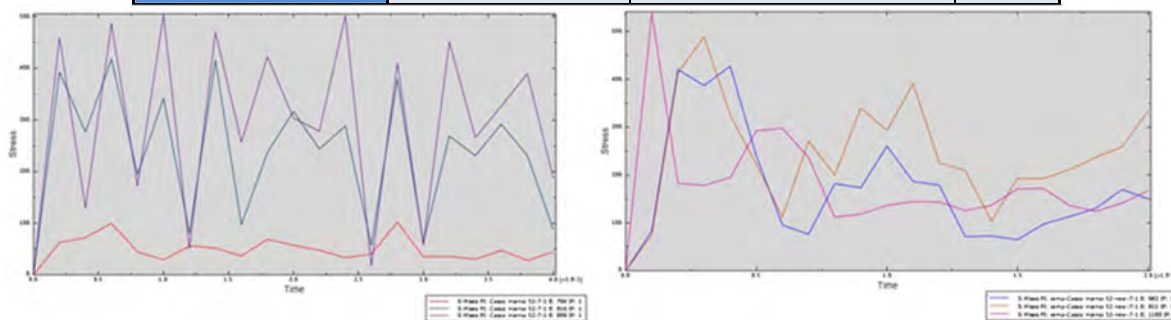
Al igual que en el caso frontal, la mayor parte de las tensiones se encuentran en el cuello, además de en la parte trasera de la cabeza, y la zona más cercana al foco de la explosión. Por otro lado tenemos una rotación del cuello según el eje Z y sobretodo, una rotación mayor según el eje Y en dirección negativa.

Le colocamos el casco:



83 - Tensiones del ensayo 6.2.3.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.3.	110	0,0006	Cabeza
	427	0,0006	cuello
	505	0,001	nuca
Con casco 6.2.3.	580	0,00015	Cabeza
	490	0,000525	cuello
	440	0,00022	nuca

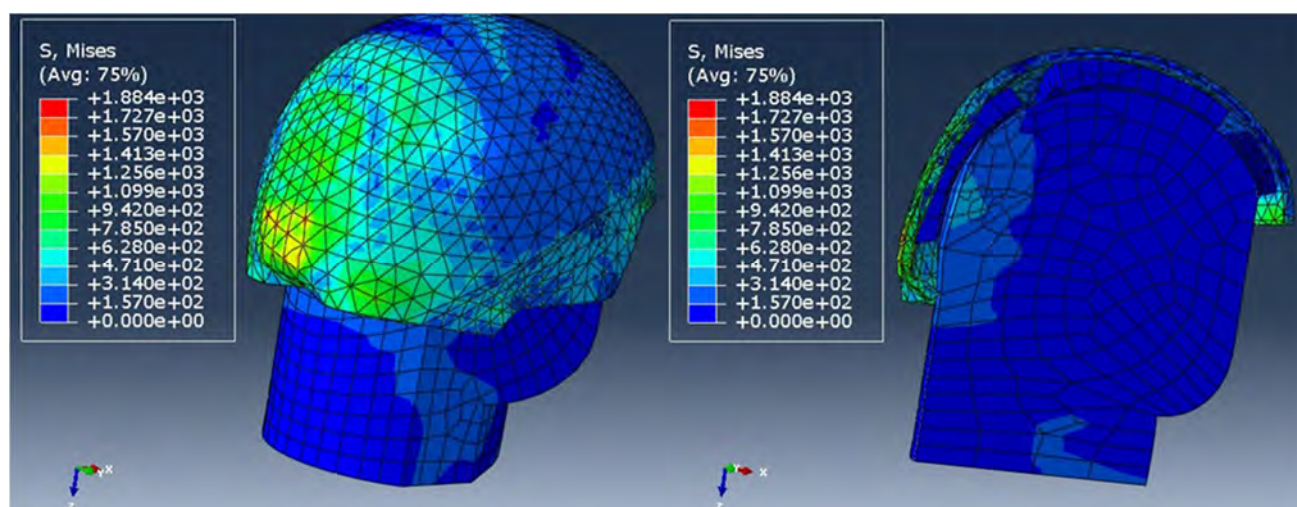


84 - De izquierda a derecha, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.3. y 6.2.3.

Debido al impacto del casco contra la cabeza aumenta mucho la tensión en ella. En contrapartida, disminuimos en parte las tensiones del cuello. La amortiguación se produjo gracias a que la tensión de la explosión se repartió por toda la superficie del casco haciendo que a la cabeza solo le lleguen tensiones de contacto.

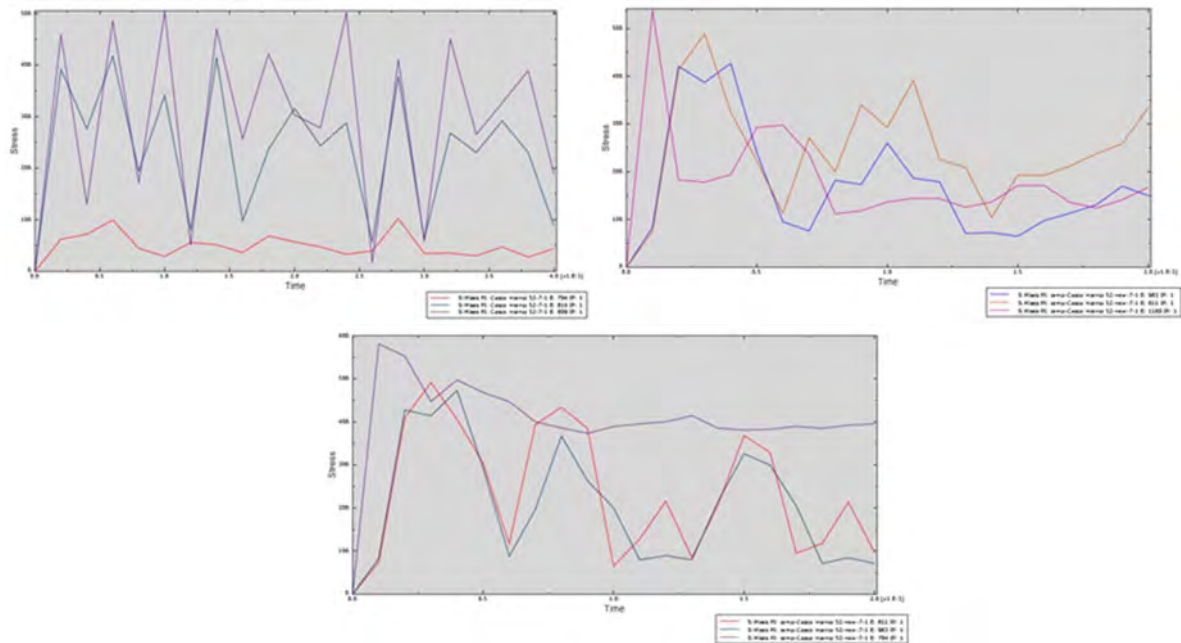
Una pega es, que según se ve en la gráfica, las tensiones del cuello van en aumento al acabar el ensayo, lo que indica que realmente no se han reducido tanto esas tensiones y habría que actuar sobre ello.

Le aplicamos las espumas:



85 - Tensiones del ensayo 6.3.3.

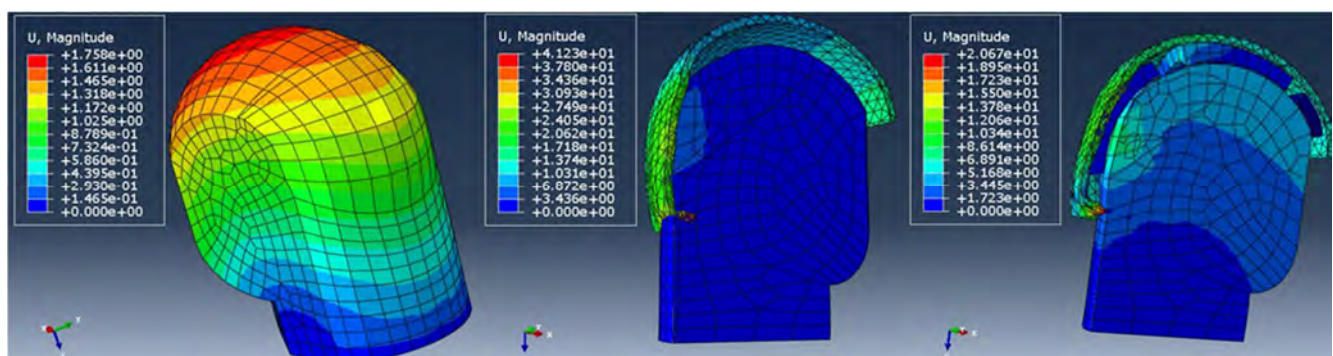
Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.3.	110	0,0006	Cabeza
	427	0,0006	cuello
	505	0,001	nuca
Con casco 6.2.3.	580	0,00015	Cabeza
	490	0,000525	cuello
	440	0,00022	nuca
Con espumas 6.3.3.	580	0,00015	Cabeza
	480	0,0003	cuello
	460	0,0004	nuca



86 - De izquierda a derecha y de arriba a abajo, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.3., 6.2.3. y 6.3.3.

Logramos evitar la penetración de la parte trasera del casco en la cabeza aunque no logramos amortiguar todas las tensiones altas que se presentan en la superficie de contacto entre las espumas y la cabeza, tampoco las del cuello. Seguimos teniendo el problema de la rotación del cuello en los 2 ejes.

El dato bueno es que si logramos armonizar la vibración de la cabeza, y además, las tensiones van a la baja, tienden a disminuir, no como el caso sin espumas, que tendían al alza.



87 - De izquierda a derecha, desplazamientos de los ensayos 6.1.3., 6.2.3. y 6.3.3.

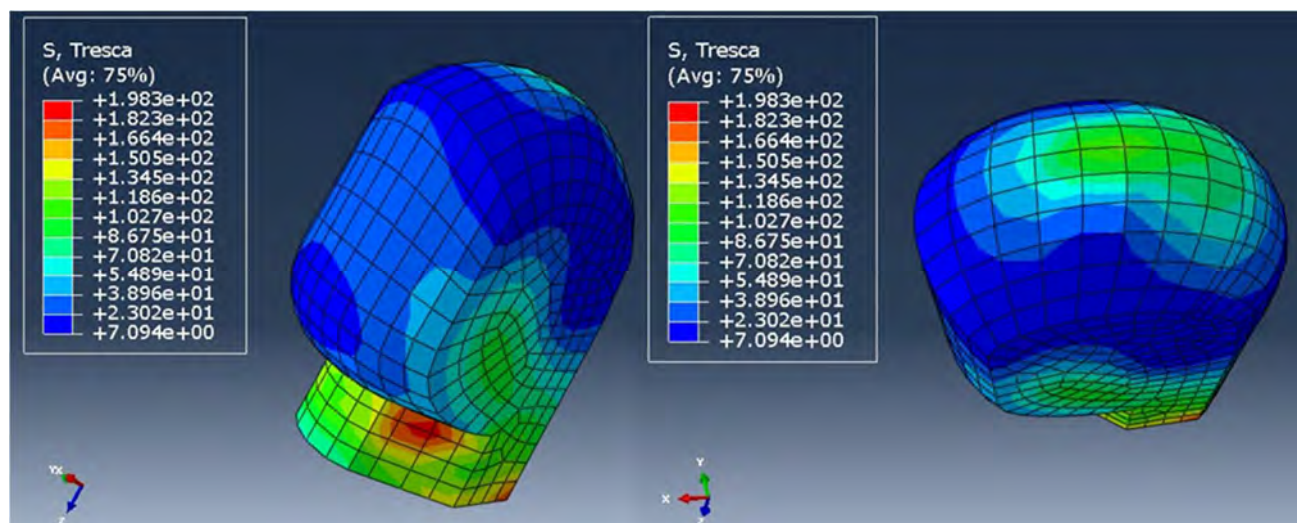
Ensayo	Desplazamiento max. (mm)
Sin casco 6.1.3.	1,758
Con casco 6.2.3.	3,436
Con espumas 6.3.3.	8,61

Los desplazamientos muestran algo similar a lo sucedido en los anteriores ensayos. El aumento del peso hace que el desplazamiento de la parte superior aumente, pero en este caso, el aumento ha sido mucho menor que en los otros. Además, el máximo de desplazamiento del ensayo con espuma no es por rotación, sino porque la propia espuma empuja la cabeza y la deforma en parte, lo que indica que no se amortiguo todo lo que podría haberse amortiguado, lo que da margen de mejora.

Como conclusiones:

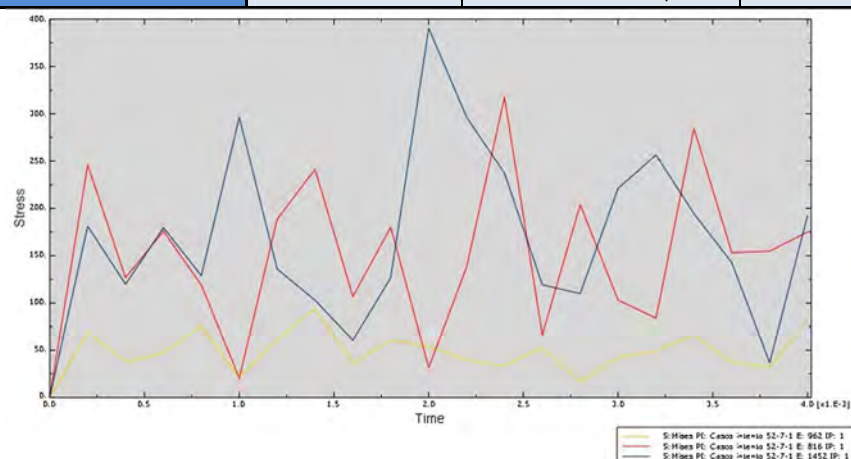
- La inclusión de las espumas impidió que la deformación del casco penetrara en la cabeza, pero un refuerzo de esa zona impediría que eso pasara igualmente.
- Aumentar el grosor de la espuma trasera aumentaría la amortiguación, evitaría el desplazamiento trasero y bajaría la tensión en la cabeza.

7.4. EXPLOSIÓN SUPERIOR



88 - Tensiones del ensayo 6.1.4.

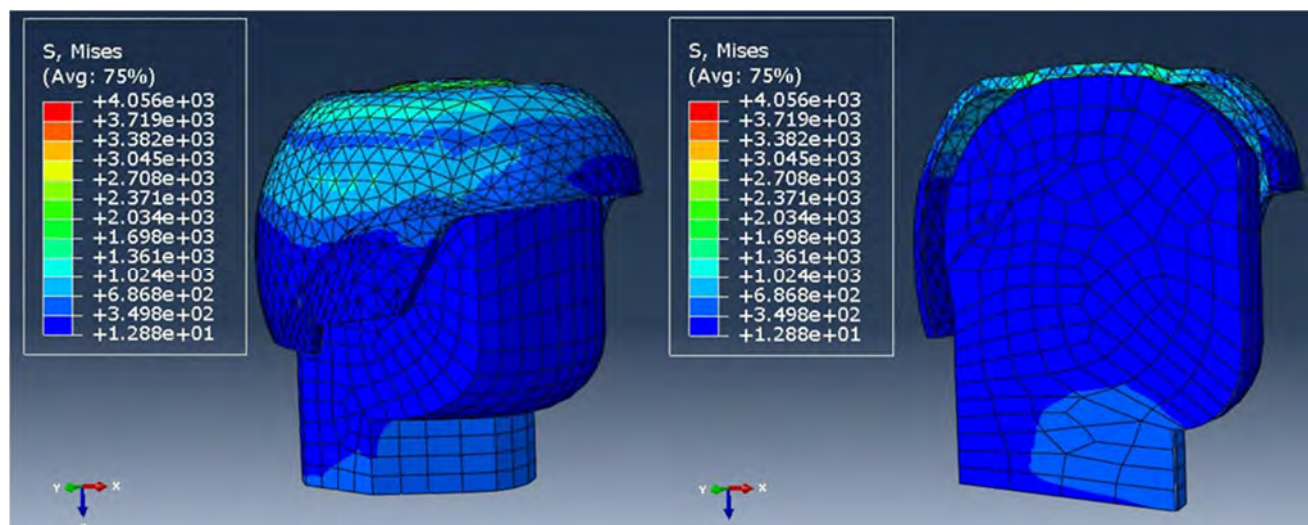
Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.4.	90	0,00138	Cabeza
	382	0,002	Cuello
	325	0,0024	Nuca



89 - Gráfica de tensión/tiempo del ensayo 6.1.4.

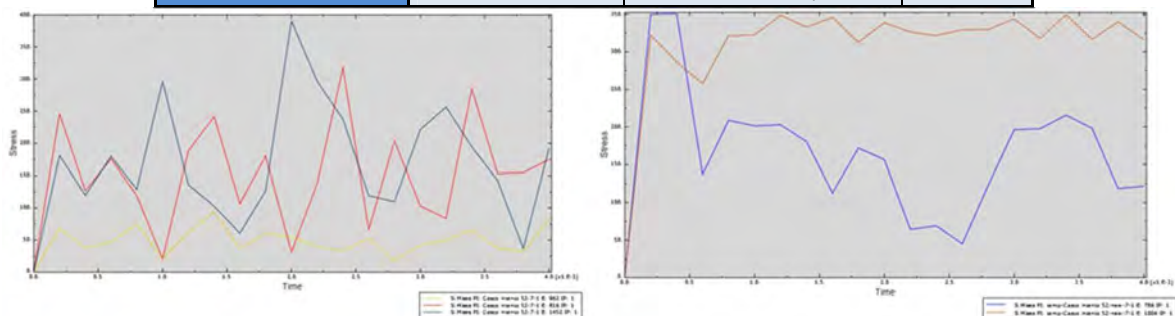
Debido a la gravedad, añadimos más tensión que en otros ensayos al cuello y a la superficie superior de la cabeza. Por otro lado, la rotación en eje Z no existe y en el eje Y es prácticamente nula. La rotación que si es peligrosa es la que inclina la cabeza hacia abajo en el eje X.

Le colocamos el casco:



90 - Tensiones del ensayo 6.2.4.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.4.	90	0,00138	Cabeza
	382	0,002	Cuello
	325	0,0024	Nuca
Con casco 6.2.4.	347	0,0034	Cabeza
	350	0,00042	Cuello
	350	0,00042	Nuca



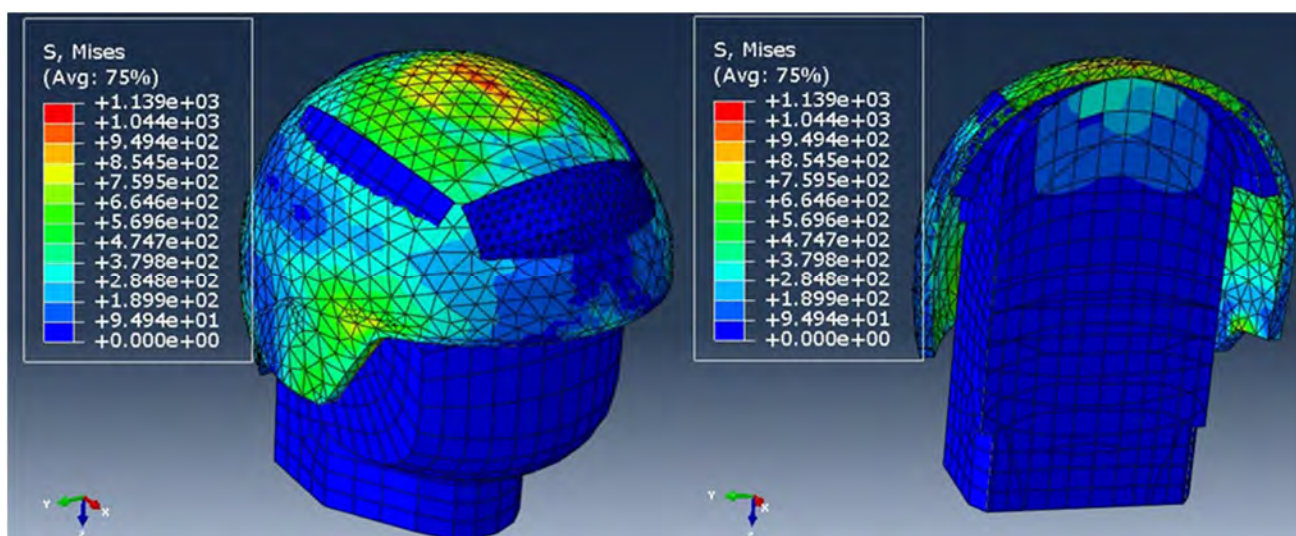
91 - De izquierda a derecha, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.4. y 6.2.4.

Gracias al casco eliminamos gran parte de las tensiones que se creaban en la superficie superior de la cabeza. Aun así, las del cuello se mantienen y las de la cabeza siguen siendo elevadas. También disminuimos la rotación en el eje X pero no demasiado.

Añadimos las espumas:

Para hacer este ensayo se tuvo que alejar el foco de la explosión ya que, con uno tan cercano no lográbamos que la espuma superior resistiera el impacto y rompía. Finalmente se consiguió simular a 300mm y que la espuma soportara.

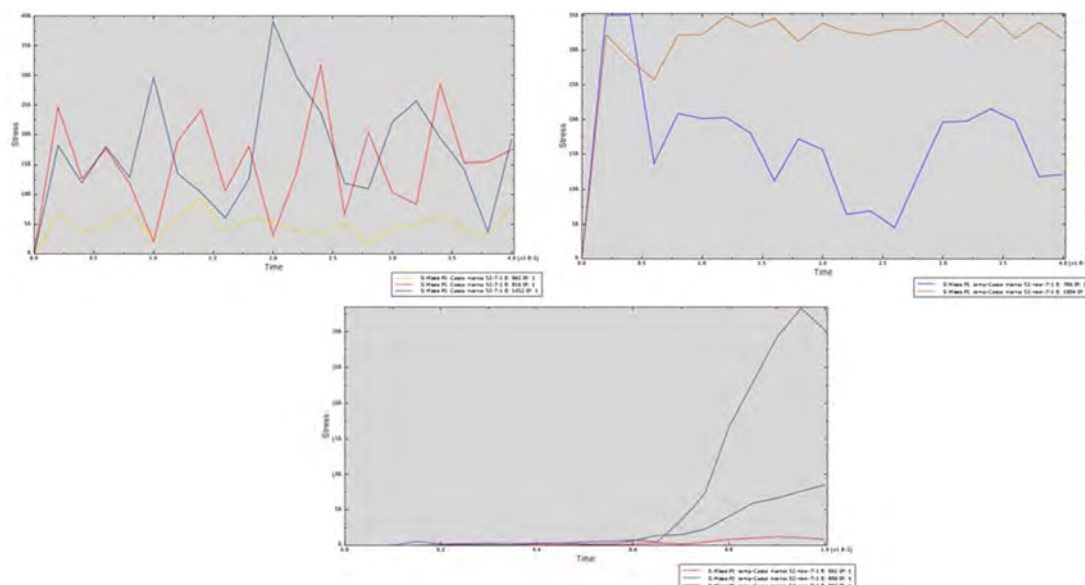
Obviamente no son buenos resultados ya que la espuma no aguantó el ensayo inicial, tendríamos que aumentar el grosor de la misma o hacerla de un material más resistente.



92 - Tensiones del ensayo 6.3.4.

Ensayo	Tensión máxima (en Mpa)	Momento del ensayo en el que se produce	Nodo
Sin casco 6.1.4.	90	0,00138	Cabeza
	382	0,002	Cuello
	325	0,0024	Nuca
Con casco 6.2.4.	347	0,0034	Cabeza
	350	0,00042	Cuello
	350	0,00042	Nuca
Con espumas 6.3.4.	370	0,00089	Cabeza
	100	0,001	Cuello
	20	0,001	Nuca

Vemos cómo, hasta el punto de la rotura, se lograron amortiguar parte de las tensiones, pero a partir del colapso de la espuma superior, tenemos un caso igual que el casco sin espuma, con lo que no supone una mejora en sí.



93 - De izquierda a derecha y de arriba a abajo, gráficas de tensión/tiempo de los ensayos 6.1.4., 6.2.4 y 6.3.4.

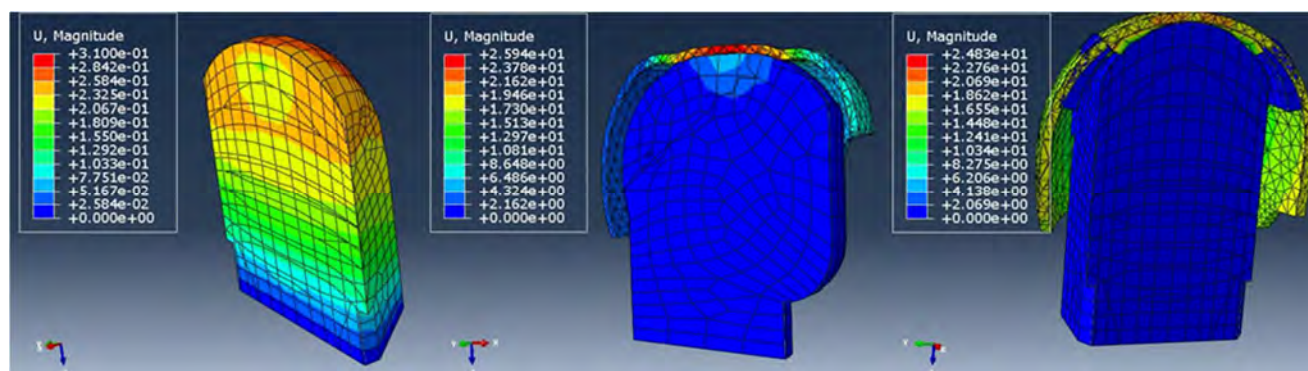
Al contrario de lo que se apreciaba observando las tensiones máximas, se puede ver cómo sí que obtenemos mejoras añadiendo el casco y las espumas.

En una primera observación, sí vemos que los puntos críticos se repiten, pero las vibraciones se amortiguan bastante. En el primer ensayo se apreciaba cómo la estructura se agita bruscamente, las tensiones de la cabeza y el cuello crecen y disminuyen con frecuencia muy alta y las vibraciones provocan mucho daño en el interior del cráneo.

Una vez añadimos el casco, esas vibraciones se suavizan, se vuelve una tensión más constante y tienden a la baja.

El tercer ensayo, pese a mostrar cómo se rompe la espuma superior, da resultados buenos que indican que la estructura, mientras aguanta, logra amortiguar casi toda la tensión que llega al cuello y reduce la que llega a la cabeza.

Así pues, si aumentamos el grosor de la que por otro lado, es la espuma más importante de todas, ya que será el punto de apoyo primario del casco con la cabeza, mejoraremos su amortiguación.



94 - De izquierda a derecha, desplazamientos de los ensayos 6.1.4., 6.2.4. y 6.3.4.

Ensayo	Desplazamiento max. (mm)
Sin casco 6.1.4.	0,31
Con casco 6.2.4.	4,32
Con espumas 6.3.4.	2,069

Los desplazamientos muestran lo comentado anteriormente con las tensiones. Mientras el casco no entra en contacto directo con la cabeza, logramos amortiguar y evitar que se deforme por la parte superior.

En este caso existe otro tipo de desplazamientos, que no se aprecian en los ensayos, pero que son muy peligrosos, aquellos que hacen descender la cabeza rotándola hacia adelante, a la altura de la barbilla, y dejando expuesta la parte trasera de la cabeza a la explosión. Debemos evitar esto, y lo podríamos conseguir colocando un bucal en la parte frontal, que frenara esa rotación.

Como conclusión de este ensayo:

- Aumentar el grosor o incluso cambiar el material de la espuma superior, ya que es la espuma más importante del sistema y la que más tensión tendrá que soportar de media en todas las circunstancias.
- Aplicando una sujeción frontal, que impida la rotación de la cabeza hacia adelante, evitaríamos daños mayores que no se aprecian en los ensayos.

8. CONCLUSIONES

Como conclusión general, de estos ensayos vemos que los añadidos han ido aportando bastante a la mejora de la seguridad del individuo, pero se deben mejorar ciertas cosas aún más:

- Aumentando el grosor de las espumas ganamos más amortiguación. Además podría utilizarse un material aún más resistente si logramos bajar la masa del casco.
- Añadir refuerzos en los bordes del casco para evitar que este se deforme hacia el interior, pudiendo herir la superficie de la cabeza.
- Añadirle un frontal, una visera y un bucal, que protejan la cara de impactos frontales, ya que, cómo hemos comprobado en nuestros ensayos, sin nada que frene la onda de choque frontal que se dirige a la cara, esta sigue recibiendo mucha tensión ensayo tras ensayo.
- Añadir un sistema de cintas, o sujeciones, para que el casco se mantenga siempre en la posición deseada y no se desplace. Gracias a esto conseguiríamos enfocar la deformación y actuar sobre ella reforzando la zona. Si el casco se mueve, tenemos un factor de arbitrariedad que no nos permite predecir por donde se deformará cada vez.

Además se pueden añadir algunas mejoras extra:

- Cambiar el material del casco, dejando solo una capa de acero que le aporte resistencia, y añadiendo el resto de casco de kevlar, que lo haría más ligero y haría que se desplazara menos la cabeza, eliminando tensiones del cuello en todos los ensayos.
- Añadir el bucal, la visera y un apoyo para el cuello añadiría rigidez al sistema, pero lo haría más compacto, apoyándose unos elementos en otros, y funcionaría mejor como bloque que solo el casco con las espumas.

En resumen, conseguimos mejorar las condiciones iniciales gracias al diseño, y no solo eso, sino que además conseguimos datos que nos dan ideas nuevas de diseño y poder seguir mejorando continuamente nuestro casco.

9. BIBLIOGRAFÍA

- VÍCTOR ANTONA GARCÍA. *Análisis del Fallo en Componentes Estructurales Metálicos Sometidos a Procesos de Perforación*. Trabajo Fin de Grado. Universidad Carlos III, Madrid, España.
- DIEGO LUIS SANTIAGO GUTIÉRREZ. *Análisis de materiales balísticos para chalecos antibalas y su viabilidad en la guardia civil*. Trabajo Fin de Grado. Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, Madrid, España.
- JOSÉ CARLOS PÉREZ ORTEGA. *Análisis numérico de protecciones balísticas bajo cargas explosivas*. Trabajo Fin de Grado. Centro Universitario de la Guardia Civil, Aranjuez, Madrid, España.
- B. ERICE, D. CENDÓN, F. GÁLVEZ, V. SÁNCHEZ-GÁLVEZ. *Modelo de rotura para materiales metálicos sometidos a distintas triaxialidades*. Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid.
- SANJEEV N K(1), VINAYAK MALIK (2), H. SURESH HEBBAR (3). *Verification of johnson-cook material model constants of aa2024-t3 for use in finite element simulation of friction stir welding and its utilization in severe plastic deformation process modelling*. (1)(3)Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology Karnataka, Surathkal, Mangalore, India. (2) Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, India
- J.R. KLEPACZKO (A), A. RUSINEK (B), J.A. RODRÍGUEZ-MARTÍNEZ (C),*, R.B. PEŁCHERSKI (D), A. ARIAS C. *Modelling of thermo-viscoplastic behaviour of DH-36 and Weldox 460-E structural steels at wide ranges of strain rates and temperatures, comparison of constitutive relations for impact problems*.
a Laboratory of Physics and Mechanics of Materials, UMR CNRS 7554, Paul Verlaine University of Metz, Ile du Saulcy, 57045 Metz, France
b National Engineering School of Metz (ENIM), Laboratory of Mechanical Reliability (LFM), Ile du Saulcy, 57000 Metz, France
c Department of Continuum Mechanics and Structural Analysis, University Carlos III of Madrid, Avda. de la Universidad 30, 28911 Leganés, Madrid, Spain
d IPPT – Institute of Fundamental Technological Research, Polish Academy of Sciences, ul. Swietokrzyska 21, 00-049 Warsaw, Poland
- WEI WANG. *Simulation of Hard Projectile Impact on Friction Stir Welded Plate*. MSc Thesis, School of Engineering, Cranfield University.
- Mecánica de sólidos: INTRODUCCION AL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITO. Apuntes, Universidad Carlos III, Madrid, España.
- SANTACREU GONZÁLEZ, C. (2014). *Análisis de las ondas de choque producidas por Artefactos Explosivos*. Universidad Carlos III, Aranjuez, Madrid, España: C.U.G.C.
- VERA COELLO, M. (2014). *Dinámica de Explosiones*. Universidad Carlos III, Aranjuez, Madrid, España: C.U.G.C.

ANEXO 1. DISEÑO DE ESTRUCTURA

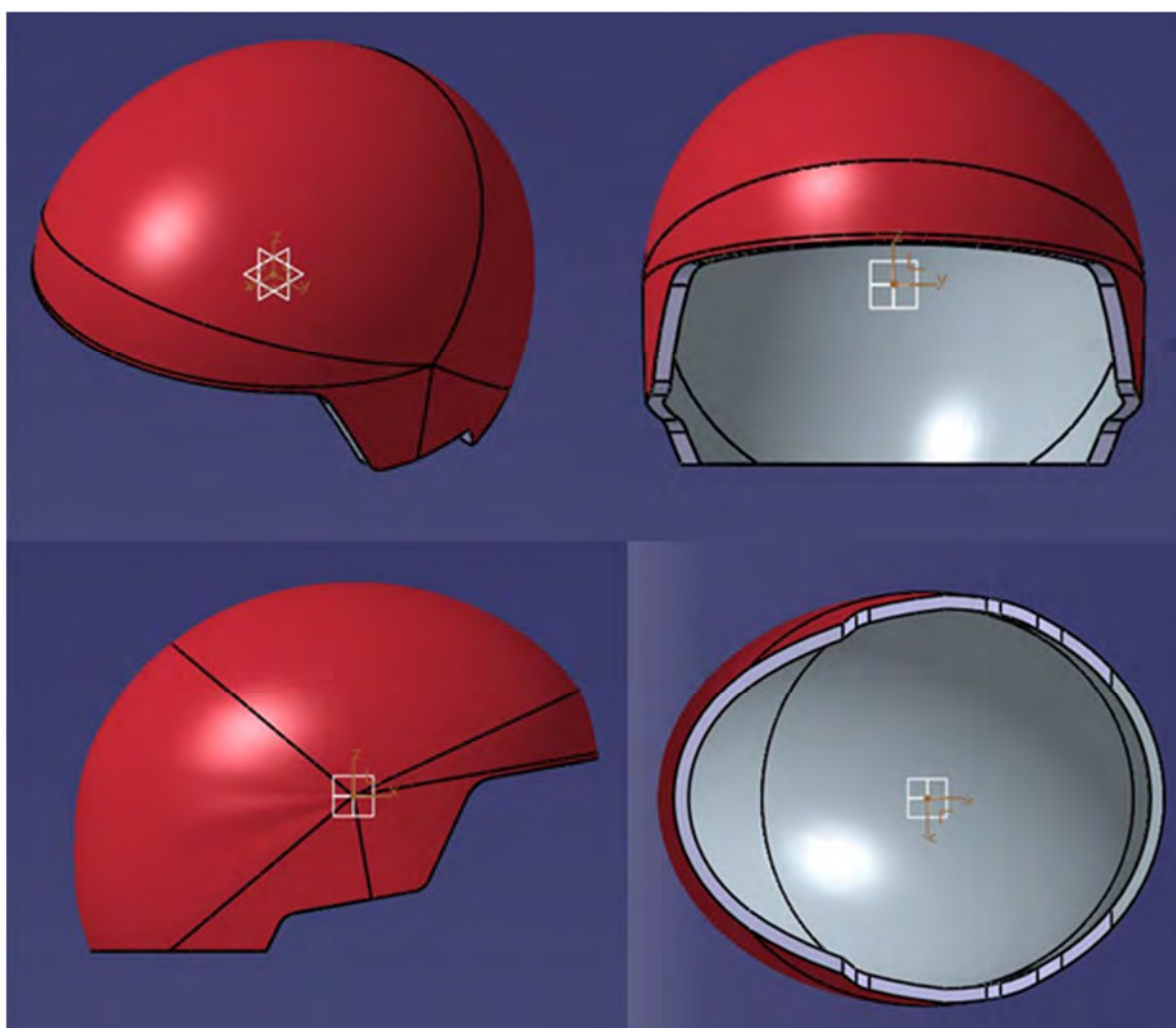
En este anexo se explicarán los pasos que se han seguido a la hora de diseñar la estructura utilizada en sus ensayos y todos sus componentes.

Se mostrarán las cotas de cada diseño y se aclarará el orden en el que fueron creados y las posibles variantes que se produjeron sin entrar en detalle en ninguno de los casos.

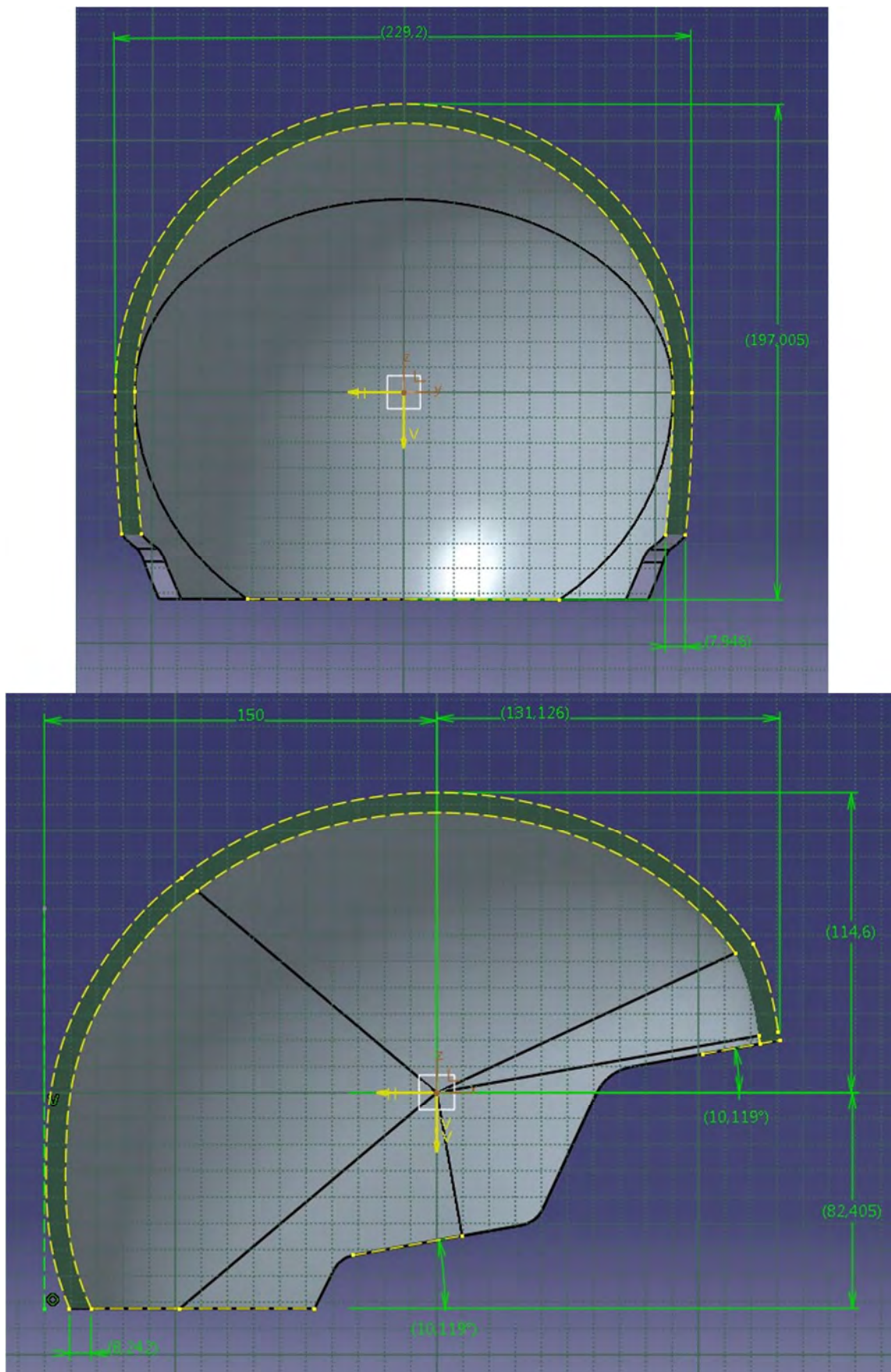
Para el inicio de este proyecto, se plantearon varias opciones de diseño a la hora de realizar el casco: en un inicio se barajó la posibilidad de ensayarlo solo y a raíz de esa idea se fue generando un diseño de perfeccionamiento.

Para empezar, se trabajó con un casco base que se realizó con medidas reales, y a raíz de él se fueron acoplando el resto de elementos.

Así pues, el primer objeto de estudio de su diseño fue el casco. Resultando de la siguiente manera:



El casco diseñado posee las siguientes medidas:



A raíz de este casco base, empezamos a añadir los elementos. Se plantearon hasta 5, aunque para este proyecto solo se utilizaron dos de ellos.

Entre ellos se plantearon el diseño de la cabeza, obviamente, para mantener el casco y poder realizar ensayos sobre ella.

El segundo elemento que se planteó fueron las espumas para amortiguar el casco una vez colocado en la cabeza.

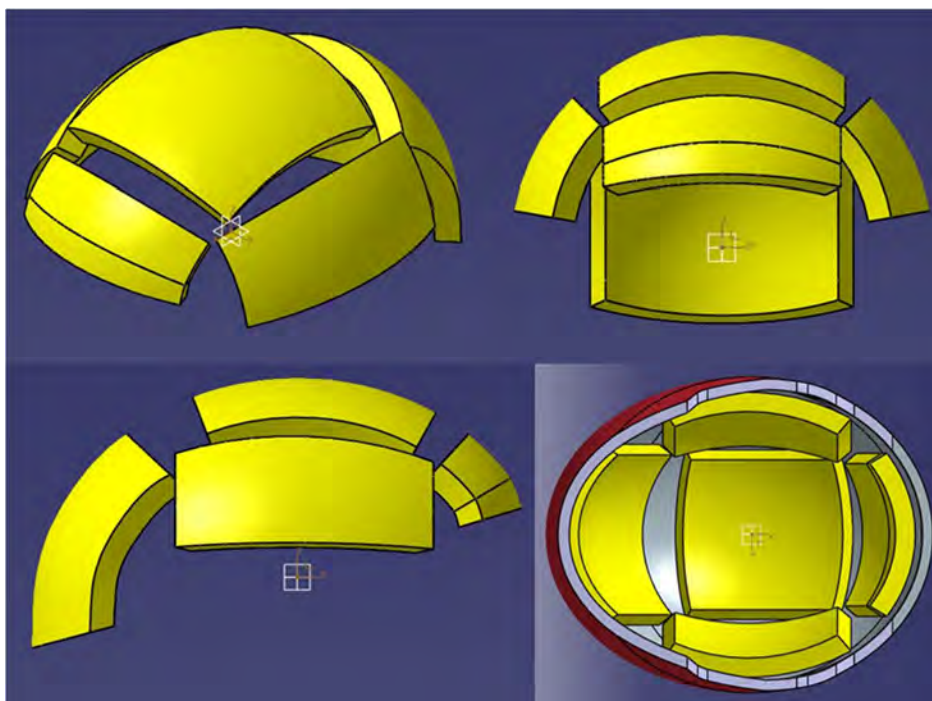
Un elemento nuevo que no se empleó para este proyecto fue la realización de una visera o protector facial, que luego podría añadirse al ensayo con un material traslucido y que protegería la cabeza dejando visión al sujeto.

Otro elemento planteado fue una protección bucal, que se colocaría debajo de la visera y actuaría de cierre del sistema, para hacerlo compacto y aumentar así su protección.

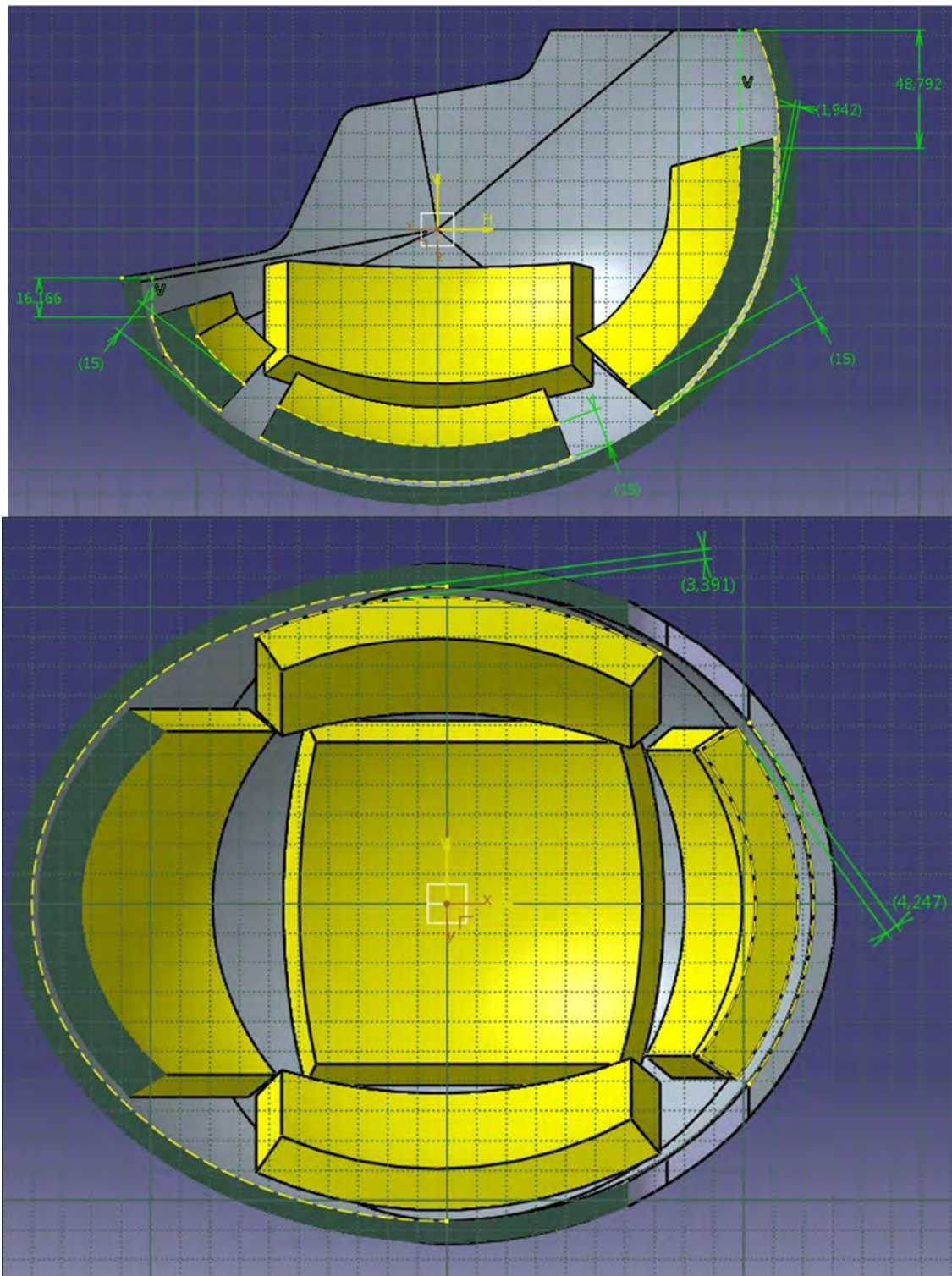
Finalmente, el último elemento que se planteó fue el apoyo cervical, para el cuello, que se encargaría de sujetar esa zona ante rotaciones bruscas.

Como se trata de un proyecto inicial, si finalizó en que tendría que constar de los 3 elementos más básicos, cabeza+casco+espumas, y así se diseñó.

Así pues, se diseñaron las espumas, y obtuvieron la siguiente forma:



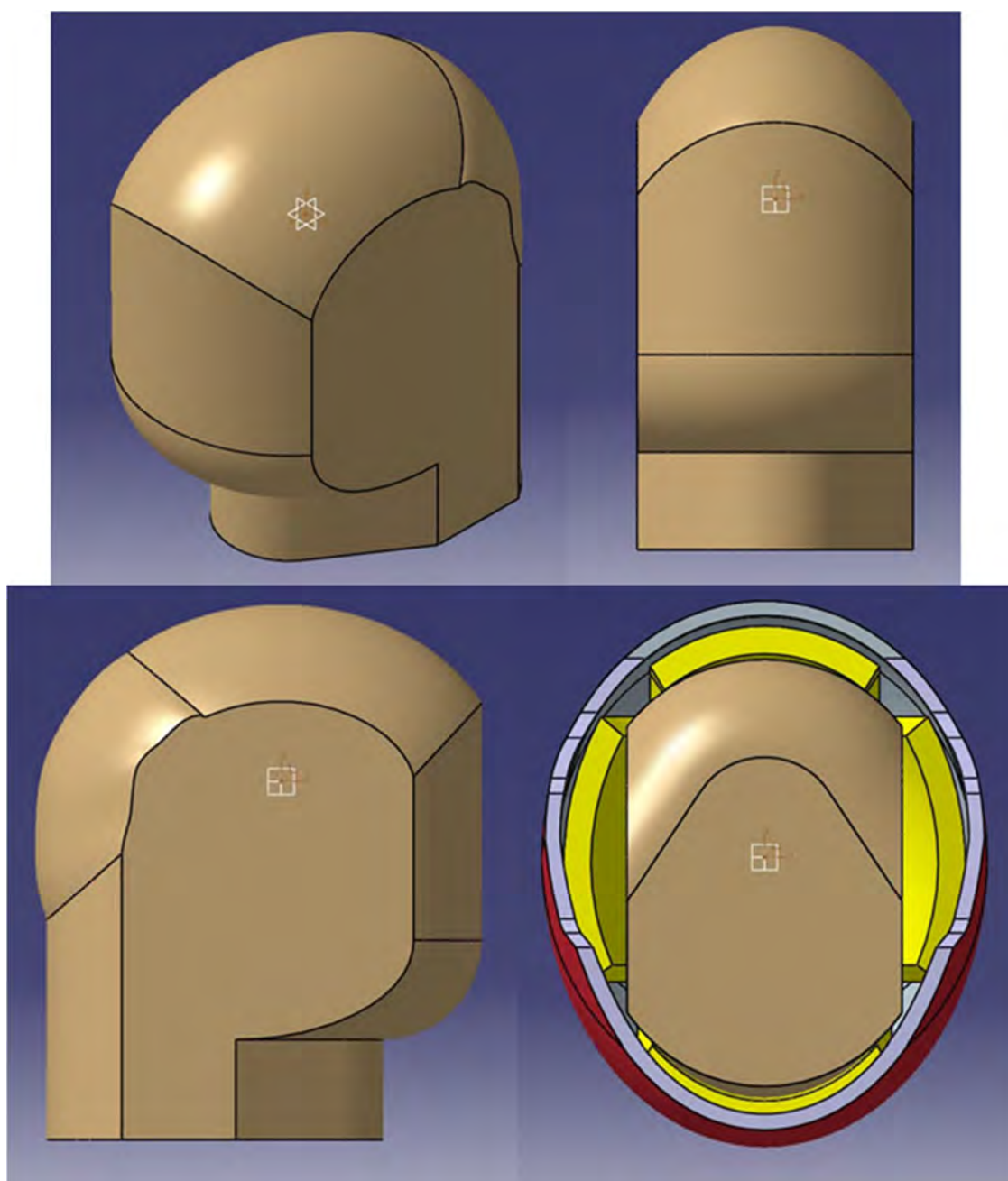
Cómo el casco base ya fue diseñado, siguiendo un orden de fuera hacia dentro, el siguiente paso serían las espumas. Para ello se utilizó el casco base como elemento de apoyo a la hora de colocar distancias de separación y formas de contorno. Resultaría más fácil apoyándonos en un diseño ya realizado que hacerlo de 0 y luego intentar encajar uno en otro.



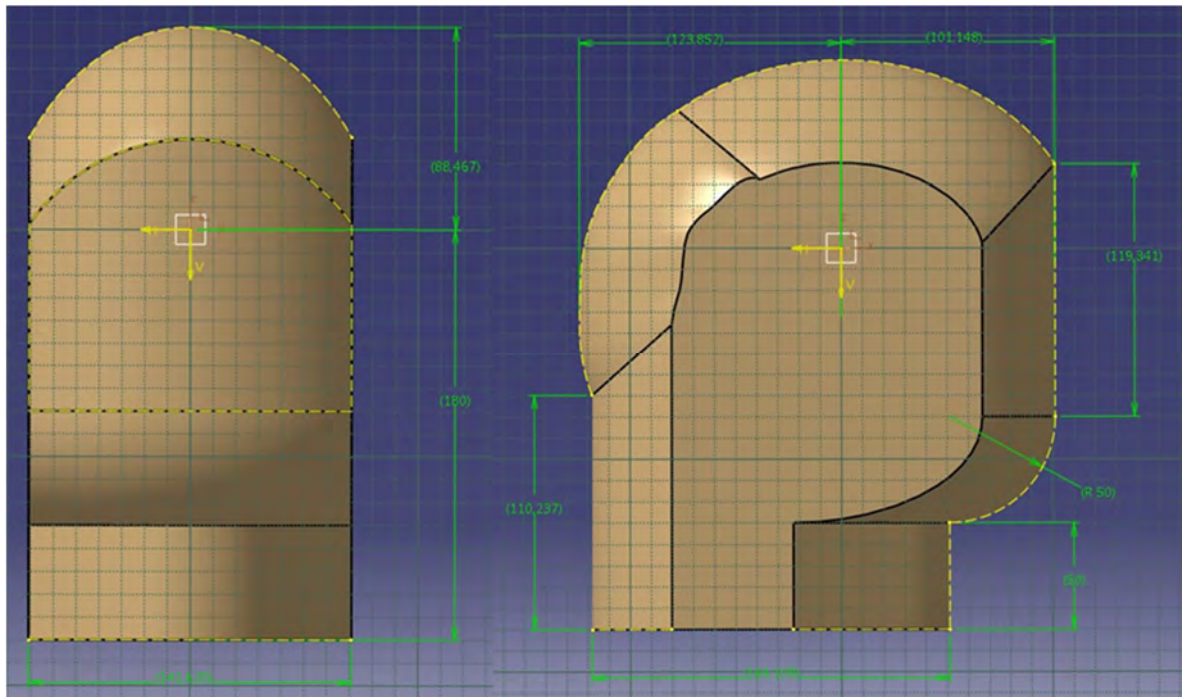
Como se aprecia en las fotos de las cotas de las espumas, la distancia entre la espuma y el casco se mantiene constante gracias a que se diseñó utilizando el casco base como apoyo. Esa distancia será la necesaria para poder utilizar un adhesivo que las fije a la parte interior del casco.

Por otra parte, se utilizó un espesor de espumas de 15mm, pero este espesor fue variando a lo largo de todo el diseño para que la cabeza tuviera unas medidas normales, ya que las medidas para el casco base se sacaron de un casco real, la cabeza, en proporción, también debía serlo.

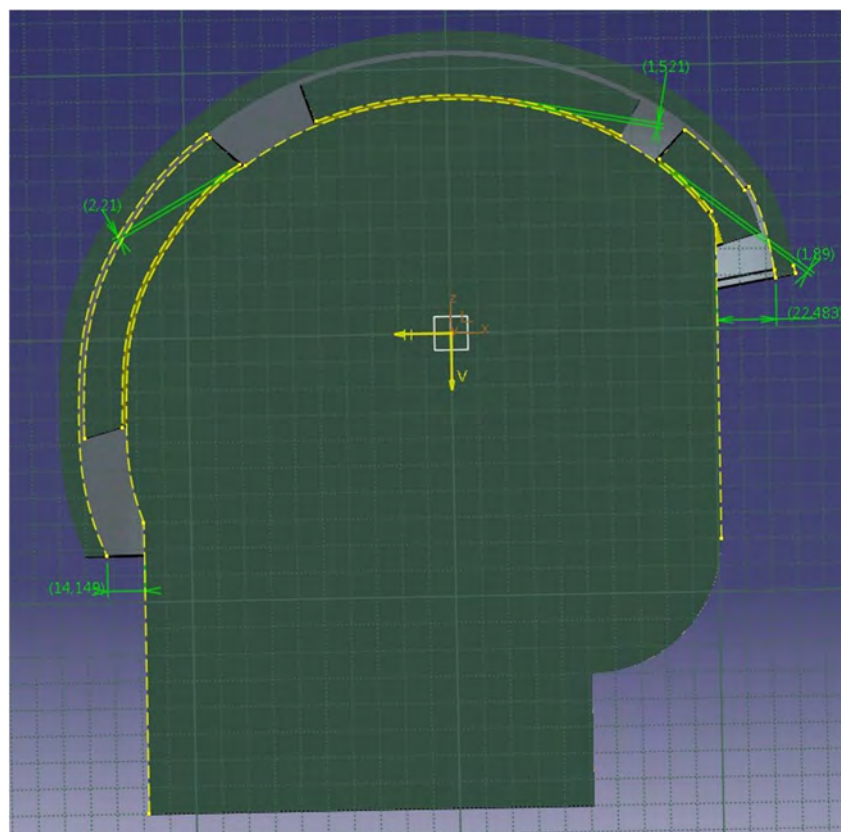
Así pues terminamos la parte de diseño creando la cabeza, a medida con el casco y las espumas para que ningún elemento interfiriera dentro de otro. Esta es la forma final que se consiguió:



Las medidas finales de la cabeza son las siguientes:



Y para poder observar las medidas de la cabeza dentro del casco, realizamos un corte para poder ver los 3 elementos juntos:



Diseñando de esta manera logramos que ningún elemento quede en contacto con otro y así lograremos que los ensayos se realicen sin fallo.

Una vez tenemos diseñados los 3 elementos, creamos un conjunto con los 3 para obtener finalmente el diseño que utilizaremos en los ensayos finales:

